INVESTIGACION y CIENCIA

TEORIA DEL TODO, ¿FINAL DE LA FISICA?

EL HOMBRE DE ORCE

EVOLUCION DE LA CORTEZA CONTINENTAL

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CONTRABANDO NUCLEAR



MARZO 1996
800 PTAS.



Marzo de 1996 Número 234

6



Contrabando nuclear
Phil Williams y Paul N. Woessner

La cantidad de plutonio necesaria para fabricar una bomba nuclear cabría en dos latas de refresco. Para otros actos de terrorismo se requiere mucho menos. Si a esas facilidades añadimos la desidia y relajación con que se controlan las reservas nucleares en Rusia y otros lugares, nos daremos cuenta cabal del peligro que encierra un mercado negro de materiales radiactivos.

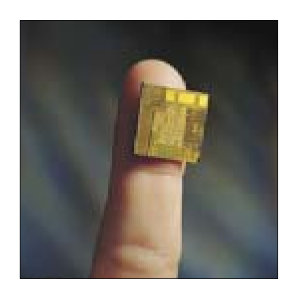
12



Restricción calórica y envejecimiento
Richard Weindruch

Para prolongar la juventud y vivir más, habrá que ir olvidándose de las calorías innecesarias sin por ello pasar hambre. Desde los unicelulares hasta los mamíferos, los organismos alargan su esperanza de vida con una dieta baja en calorías, aunque equilibrada en otros nutrientes básicos. La investigación en ratones comienza a desentrañar el misterio de la longevidad.

20



Futuro de la industria de los semiconductores
G. Dan Hutcheson y Jerry D. Hutcheson

Se oye por doquier que no se puede avanzar más en la fabricación de microcircuitos. Pero el hombre siempre se las ha ingeniado para vencer los obstáculos. El coste astrónomico que requiere hoy la construcción de una nueva planta pone también coto a las posibilidades de mejora. La solución podría hallarse en crear una mayor oferta, y más diversificada, de productos.

40

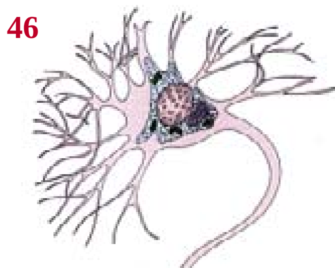


Redes nerviosas para la locomoción de los vertebrados
Sten Grillner

¿Cómo coordina el cerebro los músculos que intervienen en la marcha, la carrera o la natación? Su intervención es limitada, ya que cede parte del control a sistemas espinales. El estudio llevado a cabo en la lamprea, un pez primitivo, ha desentrañado la estructura del circuito implicado. De ese conocimiento podrían beneficiarse quienes han perdido motilidad en un accidente.

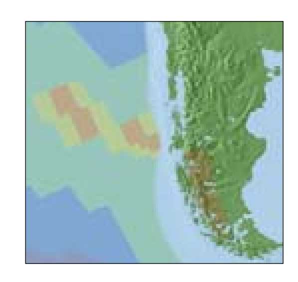
46





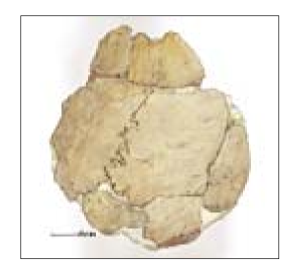
Bases moleculares del tétanos y del botulismo
Giampietro Schiavo, Ornella Rosetto y Cesare Montecucco

Casi medio millón de niños mueren todavía de tétanos. La cifra de adultos es también escalofriante allí donde no se ha generalizado la vacuna. El botulismo, por contra, centra su poder agresivo en los animales. Ambas enfermedades están causadas por proteasas tóxicas que penetran en el interior de las células nerviosas y bloquean la liberación de neurotransmisores.

56 

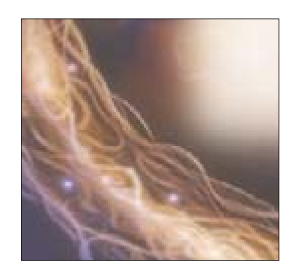
Evolución de la corteza continental
S. Ross Taylor y Scott M. McLennan

Los continentes, además de elevarse por encima del nivel del mar, flotan sobre rocas densas. De todos los mundos del sistema solar únicamente el nuestro ha mantenido suficiente actividad geológica a través del movimiento constante de sus placas tectónicas para crear tan vastas extensiones emergidas.

64 

El Hombre de Orce
Domènec Campillo y Josep Gibert

En 1982 los paleontológos desenterraron en el yacimiento granadino de Venta Micena, en la depresión de Guadix-Baza, un fragmento craneal cuya antigüedad se evaluó en 1,6 millones de años. Tras una viva polémica, en que algunos lo consideraban resto de équido, se acepta ya su carácter homínido.

70 

TENDENCIAS EN FÍSICA TEÓRICA

Explicación de todo
Madhusree Mukerjee

Desde Einstein, los físicos no han dejado de soñar con una teoría del todo, una ecuación que explique el universo. Su última y mayor esperanza reside en la dualidad, capaz de lograr que las cuerdas dejen bien atada la realidad.

SECCIONES

4 **Hace...**

28 **Perfiles**

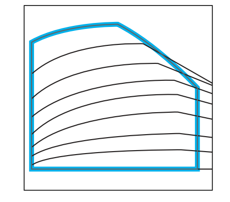
30  **Ciencia y sociedad**

La utilidad del radar.

38 **De cerca**

78 **Ciencia y empresa**

84 **Taller y laboratorio**

87  **Juegos matemáticos**

La manta de Mamá Gusano.

90 **Libros**

96 **Apuntes**



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Laurie Grace
8	Karl Gude (*dibujos*)
9	Katherine Lambert
10	Brandon Cruse
12-13	Suzanne Barnes
14	Lisa Burnett (*gráficos*); fotografía cortesía de Richard Weindruch
15	Richard Weindruch
16	Tomo Narashima (*arriba*); Dana Burns-Pizer (*abajo*)
17	Karl Gude; fotografías de Kirk Boehm, Centro Regional de Investigación de Primates en Wisconsin
18	Karl Gude; fuente: Roy L. Walford, Universidad de California en Los Angeles
21	Scot Hill
22	Jared Schneidman Design
23	Lisa Burnett
24-25	Lisa Braiman
26	Scot Hill
41	Slim Films
42	Roberto Osti
43	Roberto Osti; Tony Sica, *Gamma Liaison* (*inserto fotográfico*)
44	Carey Ballard
45	Örjan Ekeberg, Instituto Real de Tecnología, Estocolmo
46	Grabado de *Anatomy and Philosophy of Expression*, 1832
47-54	Le Science
56-57	Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA (*detalle y Venus*); Tom Van Sant, Proyecto Geosfera (*Tierra*); NASA (*Luna*)
58	Jana Brenning
59-60	Michael Goodman
61	Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio
65-69	Domènec Campillo y Josep Gibert
70-71	Al Kamajian
72-73	Laurie Grace
74-75	Fotografías de Madhusree Mukerjee
76	Laurie Grace
84	Michael Goodman
85	Laboratorio Cornell de Ornitología
87-88	Johnny Johnson

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *Contrabando nuclear*, *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Ana M.ª Rubio: *Restricción calórica y envejecimiento*; Esteban Santiago: *Redes nerviosas para la locomoción de los vertebrados*; José M.ª Valderas Martínez: *Bases moleculares del tétanos y del botulismo*; Montserrat Domingo: *Evolución de la corteza continental*; Juan Pedro Campos: *Explicación de todo*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad: Diana Estévez

Ciencia y empresa: Manuel Puigcerver

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El problema de la comodidad de la tripulación en el interior de las cabinas de mando de los aviones de larga distancia es fundamental para aprovechar todo el potencial del transporte aéreo. El problema se creyó resuelto cuando el piloto dispuso de una carlinga confortable en la que sentarse, una idea que hoy se considera gravemente errónea. Muchos de los estudios acerca del confort de las tripulaciones giran en torno de la biomecánica, o estudio combinado de la biología y la mecánica. Algunos avances, tales como la cabina presurizada, los trajes para vuelo a grandes altitudes y los alimentos perfeccionados tanto para los pilotos como para los pasajeros, representan una cantidad enorme de trabajo investigador por parte de médicos especializados e ingenieros aeronáuticos.»

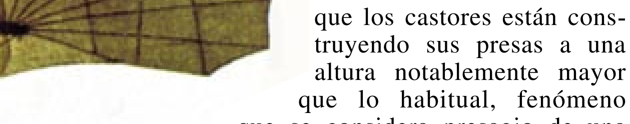
«Gracias a las resinas orgánicas sintéticas de intercambio iónico podemos hablar ya de recuperación selectiva. Cuando una solución de electrólitos atraviesa cierta resina, ésta puede absorber determinados iones. El oro y el platino pueden recuperarse convirtiéndolos en ácidos complejos que la resina reabsorbe. A partir de las cáscaras de pomelo puede prepararse pectina de alta calidad, cuando se añade resina a una pasta de la corteza de ese fruto y agua, y luego se extrae por centrifugado. En otro proceso comercial, se elimina de la leche parte del calcio para hacerla más digerible para los niños.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La fabricación de máquinas de escribir ha crecido hasta convertirse en una industria de gran magnitud en un espacio de tiempo bastante corto. Este utilísimo, por no decir indispensable, invento, con su afanoso "tecleo", que al principio se contemplaba sólo como un juguete interesante, proporciona ahora empleo a millares de trabajadores y conlleva fuertes inversiones de capital en numerosas fábricas de grandes dimensiones y potentemente equipadas.»

«Otto Lilienthal, cuyo trabajo influyó posteriormente en los hermanos Wright, escribe para *Scientific American*: "Antiguamente los hombres buscaban construir unas máquinas voladoras acabadas, pero nuestros conocimientos técnicos y experiencias prácticas estaban muy lejos de resultar suficientes para vencer en una labor mecánica de tal magnitud sin más base. A este fin he preparado un aparato a vela muy similar a las alas desplegadas de un pájaro de los que planean muy alto. Consiste en un armazón de madera revestido de tela de camisa (sarga de algodón). El armazón se ase con las manos y los brazos descansan en cojines. Las piernas quedan libres para correr y saltar. La dificultad principal reside en el lanzamiento al aire y ello necesitará siempre preparativos especiales. Si el aire está poco agitado, no se requiere mucha práctica para remontarse y volar distancias muy largas. El peligro se evita fácilmente si uno practica de manera razonable, pues yo mismo he realizado millares de experimentos a lo largo de los últimos cinco años.» [Nota del Jefe de Redacción: Desgraciadamente, Lilienthal murió en agosto de 1896, después de que su planeador se estrellara en Stölln (Alemania).]

«Se ha traído a colación la teoría de la actividad independiente de los dos hemisferios cerebrales para explicar los extraños casos de los individuos que parecen poseer dos estados de consciencia, ejemplos que brindan la base argumental de la inquietante novela de Robert Louis Stevenson "El doctor Jekyll y mister Hyde". El doctor Lewis C. Bruce informa de un caso muy convincente a favor de la teoría del doble cerebro. Un interno del Asilo de la Villa de Derby era galés de nacimiento y marinero de profesión. Sus características mentales poseían estados distintos en circunstancias distintas. En un estado intermedio era ambidextro y hablaba una mezcla de inglés y galés; pero en su estado inglés, era diestro, y en su estado galés, era zurdo.»



Otto Lilienthal en vuelo

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Sorprende lo que se relata acerca del descubrimiento de un hombre salvaje y monstruoso en los pantanos cercanos a la raya entre Arkansas y Missouri. Se dice que sus huellas miden cincuenta y cinco centímetros y que los dedos de sus pies son tan largos como los de la mano de un hombre corriente. Somos de la opinión de que o el "hombre salvaje" o el que hizo correr la historia es una figura simiesca.»

«La principal actividad económica de Bangor (Maine) es la explotación forestal y el negocio es inmenso, con serrerías que contienen 187 sierras para cortar la madera en bruto a lo largo de 20 kilómetros. Se pensaría que tan incesante y universal tala como la que tiene lugar en los bosques del norte de Bangor acabará muy pronto con toda la madera de pino allá existente; pero se nos dice que no hay peligro de ello en muchos años.»

«Los colonos asentados en el río Missouri han dado la voz de alarma al descubrir que los castores están construyendo sus presas a una altura notablemente mayor que lo habitual, fenómeno que se considera presagio de una avenida de aguas sin precedentes en ese río.»

Contrabando nuclear

Se ha fabulado mucho sobre los peligros del mercado negro de material nuclear para la seguridad del mundo. Pero basta que exista la posibilidad de que tenga éxito una sola transacción para que se extreme la vigilancia

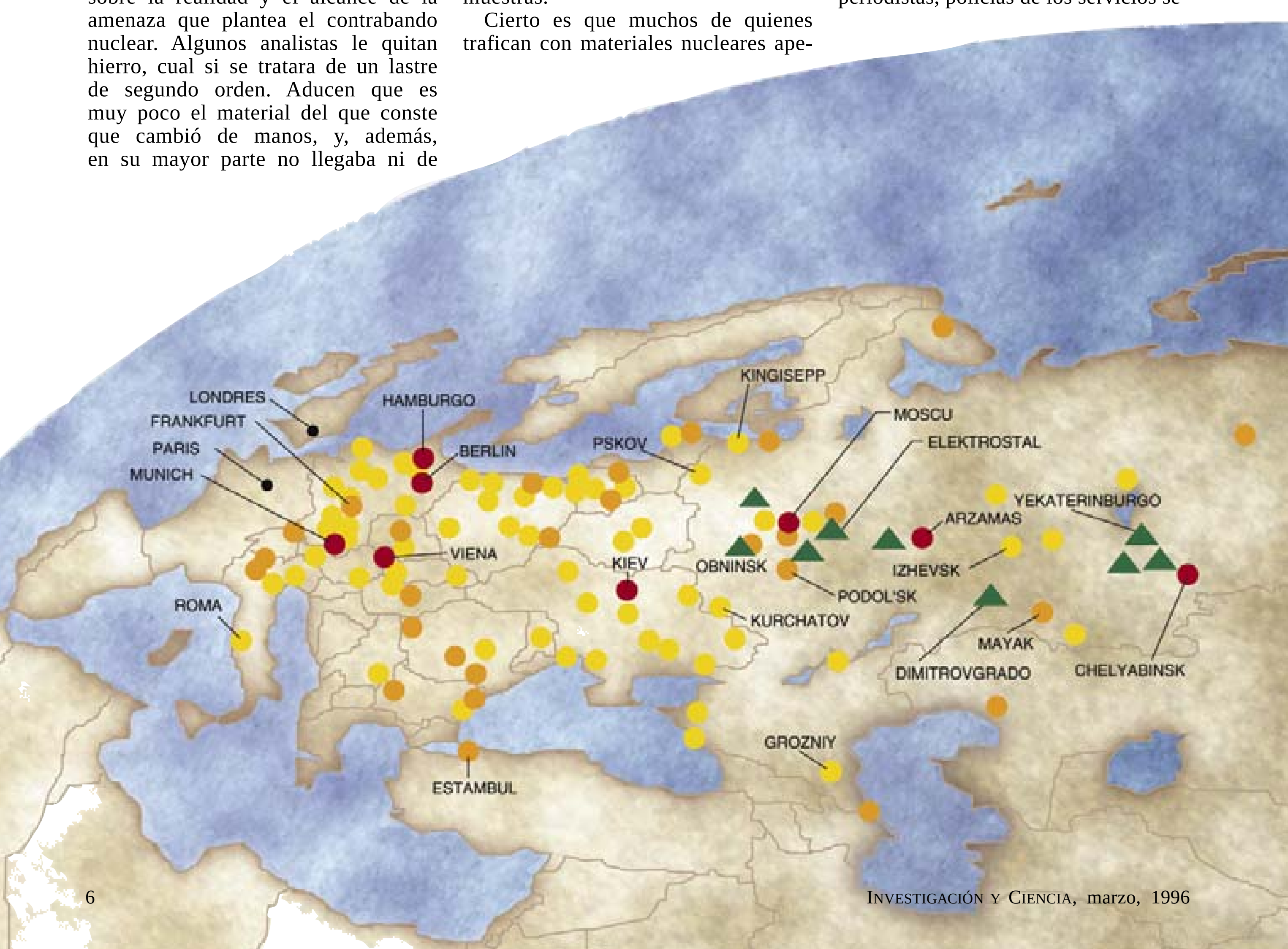
Phil Williams y Paul N. Woessner

En tiempos no muy lejanos, la gente veía en el contrabando una profesión más o menos aventurera, un medio de sortear al fisco y surtir de productos que no podían obtenerse por canales lícitos. En los años setenta y ochenta la droga añadió al problema una dimensión insidiosa. Pero el comercio de uranio y plutonio iniciado en el comienzo de los noventa ha conferido a esa práctica ilegal una importancia sin precedentes en lo que atañe a la seguridad de las naciones.

Pese a ello, no hay unidad de criterio sobre la realidad y el alcance de la amenaza que plantea el contrabando nuclear. Algunos analistas le quitan hierro, cual si se tratara de un lastre de segundo orden. Aducen que es muy poco el material del que conste que cambió de manos, y, además, en su mayor parte no llegaba ni de lejos a la calidad requerida en los usos militares. De los alijos nucleares confiscados por las autoridades occidentales en ningún caso se ha demostrado de forma evidente que procediera de silos armamentísticos. Parte del plutonio que los contrabandistas intentan vender bajo mano procede de detectores de humos. Se insiste, además, en que, entre tales advenedizos, abundan los pícaros que venden elementos estables convertidos transitoriamente en radiactivos por exposición a radiación o que consiguen grandes anticipos fiados en pequeñas muestras.

Cierto es que muchos de quienes trafican con materiales nucleares apenas si conocen exactamente lo que están robando y con lo que están traficando: un contrabandista polaco murió de envenenamiento por radiación tras haber llevado cesio en el bolsillo de la camisa; cierto carnicero de San Petersburgo estuvo guardando uranio en una jarra de salmuera dentro de su refrigerador.

Basándose en la torpeza manifestada por la mayoría de los complots de contrabando descubiertos hasta ahora, algunos observadores bien informados han sugerido que, al menos en Alemania, los únicos compradores son periodistas, policías de los servicios se-



cretos y agentes de espionaje. Algunos van más allá en su escepticismo y sostienen que ni a Irak, Irán, Libia, Corea del Norte u otros estados parias podría interesarles adquirir material nuclear ilícito en unos momentos en que se esfuerzan por normalizar sus relaciones con Occidente.

Con todo, el contrabando nuclear presenta un grave desafío. En el mercado negro de cualquier suerte sólo se ve la punta del iceberg, y no hay razones para suponer que el dedicado al material nuclear constituya una excepción. La policía aprehende como mucho el 40 por ciento de la droga que penetra en Estados Unidos, una fracción que posiblemente será inferior en el caso de Europa occidental. El tráfico de materiales nucleares es obviamente mucho menor, pero los agentes de la ley también poseen mucha menos experiencia en atajar envíos de uranio que en incautar alijos de marihuana o hachís. Caeríamos en la necedad si imagináramos que las autoridades se hacen con más del ochenta por ciento de las transacciones.

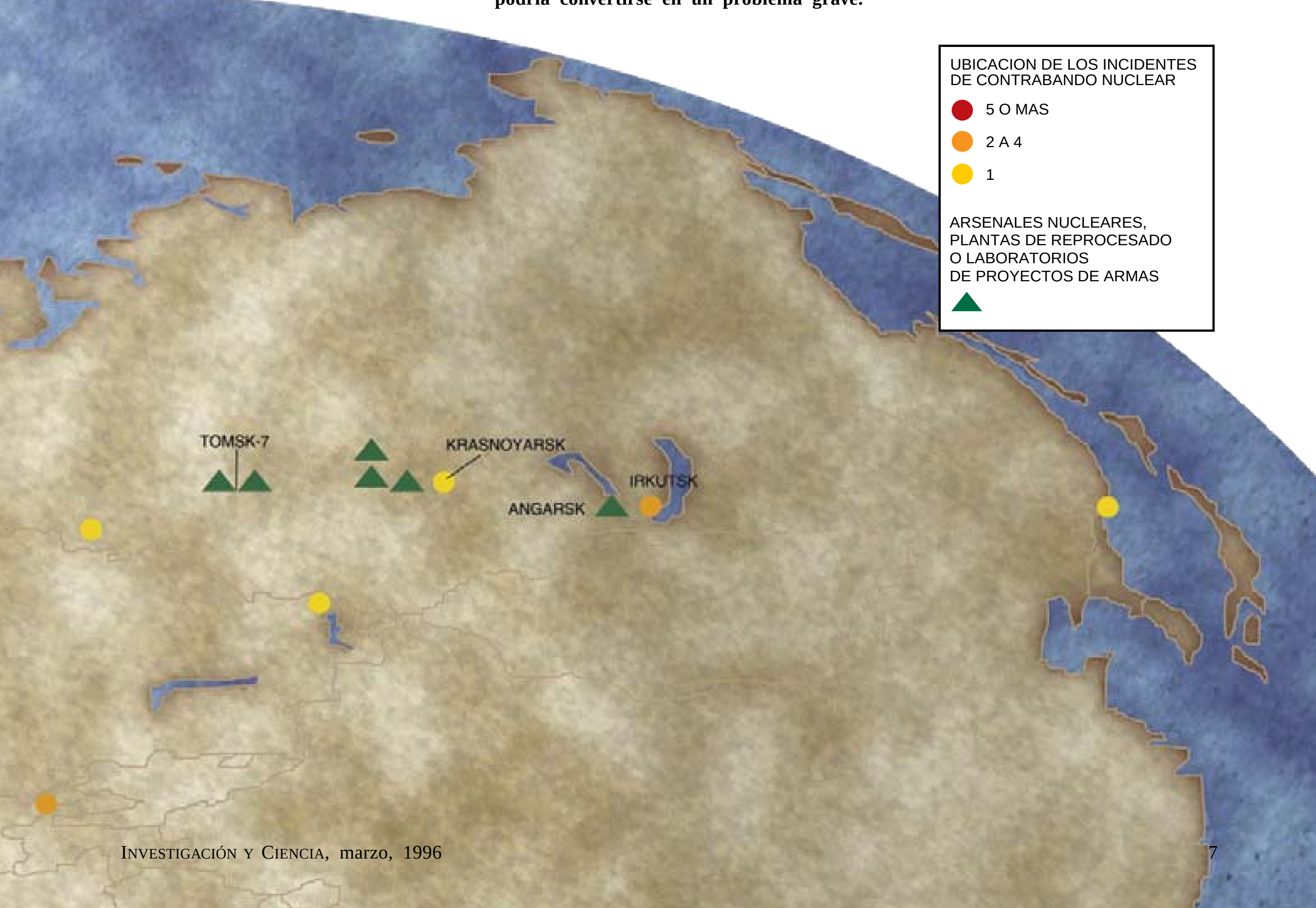
Por otro lado, cualquier montante escapado del control policial, por pequeño que fuera, podría acarrear vastas consecuencias. Aunque las reglas del secreto no permiten obtener cifras exactas, Thomas B. Cochran, del Consejo de Defensa de los Recursos Naturales en Washington, estima que una bomba necesita de tres a 25 kilogramos de uranio enriquecido o de uno a ocho kilogramos de plutonio. Un kilogramo de plutonio ocupa aproximadamente 50,4 centímetros cúbicos, un séptimo del volumen de una lata de refrescos común.

Aun cuando concediéramos que un rastreo exhaustivo de todos los envíos internacionales pudiera aprehender algunos paquetes radiactivos, conviene recordar que el uranio 235 y el plutonio 239, catalogados entre los isótopos muy peligrosos, son sólo débilmente radiactivos; lo que significa que podrían protegerse sin dificultad de la detección por contadores Geiger o aparatos similares. Los equipos de rayos X y de dispersión de neutrones, como los que se instalan en los aeropuertos para detectar explosivos químicos, podrían descubrir en principio radionúclidos; pero no están diseñados para acometer esa tarea y, por consiguiente, su eficacia en la práctica resulta limitada.

PHIL WILLIAMS y PAUL N. WOESSNER trabajan en el Centro Ridgway de Estudios sobre la Seguridad Internacional adscrito a la Universidad de Pittsburgh, que dirige el primero y en la que ejerce funciones de investigación el segundo.

La cantidad de material necesario para las armas nucleares es pequeña en términos absolutos, y, minúscula, en comparación con las ingentes reservas de uranio y plutonio altamente enriquecido, sobre todo en Rusia, donde lo mismo el control de inventarios que la seguridad dejan mucho que desear. Las existencias mundiales de plutonio, que en 1992 sumaban 1100 toneladas, en el año 2000 alcanzarán entre 1600 y 1700 toneladas, lo suficiente para fabricar hasta 200.000 bombas de

1. INCIDENTES relacionados con el contrabando nuclear registrados desde Europa central hasta la ribera rusa del Pacífico (los símbolos representan los lugares de incautación, origen o entrega). En algunos silos se está mejorando la seguridad, pero la moral de los guardianes se ve minada por culpa de la inestabilidad económica y política. A lo largo de los últimos cinco años se han producido cientos de incidentes, lo que induce a pensar que el comercio ilegal de uranio y plutonio podría convertirse en un problema grave.



Bestiario nuclear

	Uso lícito	Uso ilícito
Americio 241	Fuente de partículas alfa para detectores de humos y otros dispositivos	Fraude (sustituto de elementos deseados)
Berilio	Reflector de neutrones en reactores o bombas	Reactores ilegales; armas nucleares
Cesio 137	Fuente de radiación en aplicaciones médicas e industriales; presente en los residuos radiactivos de los reactores	Fraude; asesinato por radiación
Cobalto 60	Fuente de radiación gamma en aplicaciones médicas e industriales	Fraude; asesinato por radiación
Litio 6	Armas termonucleares	Armas termonucleares
Plutonio	Fuente de partículas alfa para detectores de humos; armas nucleares; combustible de reactores nucleares	Fraude; armas nucleares
Polonio 210	Fuente de partículas alfa y de neutrones en aplicaciones industriales	Armas nucleares
Uranio	Combustible de reactores nucleares; armas nucleares	Fraude; armas nucleares
Zirconio	Material estructural de reactores nucleares	Reactores ilegales

10 kilotones. Con el cumplimiento de los tratados de desarme, habrá disponibles, en EE.UU. y Rusia, otras 100 toneladas de plutonio refinado de calidad militar. Por ironía de las cosas, va a resultar que, en el mundo de la posguerra fría, uno de los lugares menos peligrosos para guardar el plutonio sea la cabeza de un misil.

Los Estados Unidos guardan unas 650 toneladas de uranio altamente enriquecido. Otras tantas hay en el bloque de países que antaño formaban la Unión Soviética, donde a la magnitud de las reservas hay que añadir la inquietud que provoca su control laxo incompleto. En particular, los arsenales rusos adolecen de una seguridad poco estricta, una gestión deficiente de los inventarios y unas medidas insuficientes. Los equipos para determinar la cantidad de plutonio producido son primitivos; y sin una referencia clara, es imposible saber lo que podría faltar.

La falta casi absoluta de seguridad en las instalaciones nucleares agrava el problema. El hundimiento del KGB arrastró consigo buena parte del sistema de control nuclear. Bajo el régimen soviético, la seguridad era tan estricta cuan superflua. Los empleados, leales, estaban bien pagados y gozaban de una posición elevada. Pero con la caída de los salarios y las condiciones de vida, el descontento se ha extendido. Con una fuerza laboral sin motivación alguna, pagada mal y tarde, han prendido los estímulos para el robo nuclear, al par que se han minado prohibiciones y controles.

En noviembre de 1993 un ratero penetró por un agujero de una valla en el recinto, supuestamente seguro, del astillero de Sevmorput cerca de Murmansk. Con una sierra para metales abrió el candado que daba acceso a una sección del almacén donde se guardaba combustible para submarinos nucleares; robó piezas de tres montajes de combustible, cada una de ellas con 4,5 kilogramos de uranio enriquecido. Aunque al final se recuperó el uranio, el funcionario que dirigió la investigación, Mikhail Kulik, presentó un informe estremecedor: no había sistemas de alarma, ni luces ni centinelas suficientes. Señaló con causticidad: “Probablemente hoy se custodien las patatas mucho mejor que los materiales radiactivos.” Las mejoras de seguridad introducidas en la base a raíz del incidente han sido muy modestas.

La situación no está degradada del todo. Según informes, algunas de las ciudades nucleares (polígonos antaño secretos donde se diseñaban y fabricaban bombas) cuentan con sistemas idóneos de seguridad y allí los controles sobre los materiales de calidad militar suelen ser más rigurosos que los observados sobre materiales de nivel inferior. Aunque se dice que, durante 1995, se dobló el número de intentos de penetrar en la zona prohibida de Arzamas-16 (laboratorio ruso de diseño de armas, homólogo del norteamericano Laboratorio Nacional de Los Alamos), parece que conserva un sistema eficaz de seguridad. Además, Rusia está empeñada en restablecer los niveles de seguridad para toda su industria nuclear; en algunos casos, como en el Instituto Kurchatov de Energía Atómica en Moscú, con la ayuda directa de EE.UU. Pero se trata de una tarea titánica. Dispersos por la antigua Unión Soviética hay un millar de silos de uranio y plutonio enriquecido.

Con semejante telón de fondo, a nadie sorprenderá que el número de incidentes relacionados con el contrabando nuclear (reales o supuestos) haya aumentado durante los últimos años. Las autoridades alemanas informaron de 41 en 1991, de 158 en 1992, de 241 en 1993 y de 267 en 1994. Aunque en su mayoría no afectaban a materiales adecuados para

bombas, conforme aumenta el número de incidentes aumenta también la probabilidad de que algunos por lo menos incluyan aleaciones aptas para armas.

En marzo de 1993, según un informe procedente de Estambul, entraron en Turquía seis kilogramos de uranio enriquecido a través del puesto fronterizo de Aralik, en la provincia de Kars. De acuerdo con todos los indicios, el material había ido de Taskent a Grozny; en esta plaza intervinieron grupos de delincuentes chechenos. De Grozny el material pasó a Nakhichevan vía Georgia, antes de llegar a Estambul. Aunque no se confirmó oficialmente ni el incidente ni el grado de enriquecimiento del uranio, corrió el temor de que grupos de la "mafia" chechena hubieran obtenido uranio enriquecido de Kazakstán. El acuerdo firmado en 1994 entre Kazakstán y los Estados Unidos sobre transferencia a Norteamérica de uranio enriquecido respalda la posibilidad del mencionado rumor.

En octubre de 1993 la policía incautó en Estambul 2,5 kilogramos de uranio 238 y detuvo a cuatro hombres de negocios turcos, junto a cuatro agentes sospechosos del servicio secreto iraní. Una revista de Munich publicó más tarde que el uranio podría haber llegado a Turquía vía Alemania. Según uno de los detenidos turcos (un profesor universitario que ya había estado implicado en el contrabando de antigüedades), el uranio fue enviado a Estambul por cómplices en una avioneta Cessna desde Hartemholm, aeródromo privado cercano a Hamburgo propiedad de comerciantes de armas iraníes.



2. LINGOTE DE URANIO AGOTADO, de unos siete kilogramos de peso. Cabe perfectamente en la mano de Thomas B. Cochran, físico adscrito al Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, en Washington. En su opinión, bastaría una cantidad similar de material de calidad militar para construir una bomba capaz de destruir una ciudad pequeña.

En lo que supone un paso significativo, en 1994 se produjeron varios incidentes relativos a material que era de calidad militar o muy próxima a ello. El 10 de mayo, la policía de Tengen (Alemania) halló seis gramos de plutonio 239 en el registro del domicilio de un hombre de negocios llamado Adolf Jaekle, mientras buscaba pruebas de contrabando de otro tipo de mercancía. Los funcionarios se encontraron por casualidad con el plutonio, escondido en un recipiente del garaje. Jaekle disponía de amplios contactos; entre éstos, con antiguos oficiales del KGB y la Stasi (policía secreta de la antigua Alemania del Este). También estaba relacionado con Kintex, compañía de armas búlgara sobre la que, desde hace tiempo, corre la sospecha de múltiples actividades infames. Aunque se han disipado gran parte de las especulaciones iniciales, siguen abiertas varias cuestiones inquietantes acerca del caso Jaekle. Resultaría imprudente excluir la posibilidad de que el uranio fuese sólo una muestra de una transacción mucho mayor.

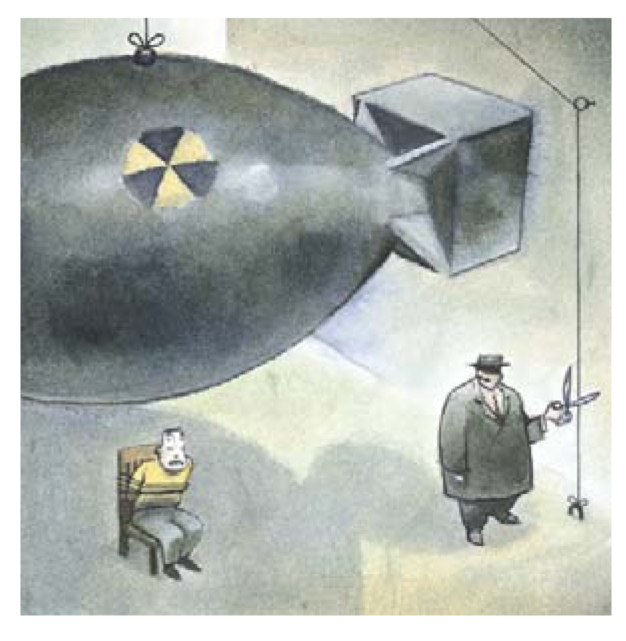
El 10 de agosto las autoridades de Munich detuvieron a dos ciudadanos españoles y un dentista colombiano en posesión de 363,4 gramos de plutonio de alta ley y 201 gramos de litio 6 (un componente de las bombas de hidrógeno). Habían traído el contrabando hasta Munich desde Moscú en un vuelo de Lufthansa. Se les detuvo con mucha espectacularidad: como se descubrió más tarde, habían sido agentes de la BND, el servicio de inteligencia federal alemán, los que indujeron a aquellos traficantes esporádicos a introducir el material nuclear.

La operación desencadenó, en efecto, una acalorada polémica en Alemania. Se acusó al servicio secreto de propiciar el contrabando nuclear en vez de atajarlo. Ninguno de los tres inculpados tenía relación con el narcotráfico colombiano ni con el terrorismo separatista vasco. No había pruebas de que fueran contrabandistas experimentados. Simplemente pasaban apuros financieros y pretendieron resolverlos vendiendo el litio y el plutonio. Sin embargo, en medio de la controversia acerca de la corrección y oportunidad de las acciones de la BND se perdió de vista un aspecto importante. Pese a ser aficionados, adquirieron una cantidad importante de plutonio de alta ley.

Meses después, el 14 de diciembre, la policía detuvo en Praga a tres hombres que viajaban en un automóvil con 2,7 kilogramos de uranio 235 altamente enriquecido (87,7 por ciento). Dos de ellos eran expertos nucleares que habían llegado a la República Checa ese mismo año de 1994: un ruso procedente de una población cercana a Obninsk y un bielorruso de Minsk. El tercero era un físico nuclear checo, Jaroslav Vagner, que hacía varios años había dejado oficialmente su empleo en la industria nuclear. A mediados de 1994 había aparecido una muestra de uranio de enriquecimiento similar en Landshut (Baviera); el 22 de marzo de 1995, dos hombres más, uno de ellos oficial de la policía, fueron arrestados con relación al incidente de diciembre.

Las bombas y el hampa

Aunque los países instalados al margen de la ley constituyan, sin duda, los principales clientes del mercado negro de armas nucleares, resulta evidente el peligro de que la delincuencia organizada y grupos terroristas puedan sumarse al club nuclear. Entre el tráfico de material nuclear y su uso directo no hay más que un paso, nada difícil de dar: los asesinos ya han recurrido para su propósito al uso de isótopos radiactivos. A finales de 1993, la “mafia” rusa instaló pastillas emisoras de rayos gamma en la oficina de un hombre de negocios moscovita, que le causó la muerte en menos de tres meses. Desde entonces, se han producido en Rusia, que se conozcan, una docena de incidentes similares.



Cualquier organización criminal podría asimismo emplear radionúclidos para extorsionar a gobiernos y empresas. Para un chantajista nuclear sería bastante sencillo avalar su credibilidad adelantando una muestra para análisis. La amenaza ulterior con contaminar los conductos de aire o las cañerías del agua corriente, e incluso detonar una pequeña arma nuclear, podría ejercer una presión oprimente. Tampoco debe excluirse que cualquier organización terrorista o culto extremista, recuérdese el que lanzó gas nervioso en el metro de Tokio en 1995, pudieran adquirir materiales radiactivos.

Aun cuando ninguno de esos grupos consiguiera uranio o plutonio suficientes para construir una arma de fisión, podría mezclar isótopos inestables con explosivos clásicos para provocar una contaminación generalizada. Por ejemplo, si los terroristas que colocaron la bomba en el World Trade Center de la ciudad de Nueva York hubieran hecho uso de sustancias radiactivas, el recuento de muertos los reseñaría por miles y se habría hecho inhabitable un importante distrito de negocios.

P. W. y *P. N. W.*

Al menos en Alemania, los casos de contrabando han disminuido desde que se dio sonora publicidad a las detenciones mencionadas. Todo indica que los traficantes han tomado otras rutas. Algunos han atravesado Suiza y Austria camino de Italia. Pero la mayoría podría estar dirigiéndose hacia el sur a través de las repúblicas de Asia Central y el mar Negro. Tal como ha apuntado David Kay, antiguo inspector de la Agencia Internacional de Energía Atómica, esas rutas son las mismas que seguían, en sentido inverso, los agentes del KGB en su introducción fraudulenta de productos occidentales en la antigua Unión Soviética. Se trata de regiones donde los controles fronterizos son menores que los que conducen a Europa occidental y los clientes potenciales se hallan más próximos.

Algunos de los alijos aprehendidos en Alemania y Turquía dejan fuera de duda que los estados al margen de la ley como Irán podrían estar procurándose material nuclear de alta calidad. Más: algunos, tal parece, han montado sus propias redes. Libia e Irak tienen experiencia en tales procedimientos; crean empresas de fachada para tapar el mercado negro de productos precursores y equipos que les permitan fabricar armas químicas.

Por si fuera poco, y como se infiere del caso Jaekle, los contrabandistas no son ahora torpes intrusos. Aunque no exista una mafia nuclear monolítica, ex-espías pertenecientes a los países del antiguo bloque soviético parecen estar adquiriendo un papel dirigente en las redes profesionales. A ellos se han unido empresarios, relacionados por lo común con el negocio de las armas, cuyas actividades forman un espectro continuo que va desde lo legal hasta lo ilegal, pasando por lo dudoso.

Puesto que el contrabando nuclear es un negocio de grandes posibilidades lucrativas, nada tiene de extraño la intervención de la delincuencia organizada. Algunas bandas turcas parecen andar involucradas en este comercio; tras haberse graduado en la exportación ilegal de antigüedades, el uranio se ha convertido para ellas en una mercancía más.

En Italia, Romano Dolce, un magistrado que investigaba el comercio nuclear, fue detenido por participar en los mismos delitos que perseguía. Tamaño escándalo planteó la duda fundada de si no se habría centrado en algunos casos al objeto de desviar la atención de otras transacciones de mayor calado.

Pero la cuestión más preocupante concierne a la participación de la delincuencia organizada rusa. Aunque el tráfico nuclear no parezca contarse entre sus prioridades (hay otras actividades más lucrativas a corto plazo y menos arriesgadas), se multiplican las pruebas de la orientación de grupos criminales rusos hacia el mercado negro radiactivo.

Se han realizado esfuerzos serios para atajar el problema de raíz. Sin embargo, la comunidad internacional ha respondido con lentitud a los peligros que presenta el contrabando nuclear. La oficina rusa de supervisión nuclear (GAN) cuenta ahora con 1200 empleados, pero se desconoce la autoridad que realmente pueda ejercer sobre la antigua burocracia nuclear, lo mismo civil que militar.

Además, aun cuando el GAN tenga éxito, se tardará varios años en poner al día los dispositivos de seguridad. Nadie se imagina que los traficantes vayan a permanecer en huelga de brazos caídos. Por consiguiente, para cosechar buenos resultados habría que disponer, en estos años que quedan antes del cambio de milenio, de eficaces servicios de información y de mecanismos de aplicación rigurosa de la ley. Sin embargo, las instituciones internacionales no se han prestado

todavía a ofrecer la necesaria colaboración a quienes tienen la responsabilidad de detener el comercio ilegal. La IAEA y la Sección de Prevención del Delito y de Justicia Criminal de las Naciones Unidas tienen ambas su sede en el Centro Internacional de Viena, pero las normas de la IAEA le impiden comprometerse en actividades de investigación. Lo que quiere decir que las relaciones entre una y otra han sido fragmentarias e inconexas.

Mientras tanto, el gobierno norteamericano ha reaccionado mal y sin un plan coordinado ante el problema que plantea el mercado negro de material nuclear. Desde 1994, el FBI tomó la dirección y ha venido trabajando estrechamente con la Agencia de Defensa Nuclear y la Agencia de Inteligencia de la Defensa. Pero el país dista todavía de emprender una política comprehensiva.

Sugerimos que, cuanto antes, se tomen medidas coordinadas de alcance transnacional que impidan el robo en los puntos de origen, intercepten el tráfico y disuadan a los compradores. Los Estados Unidos, Alemania, Rusia y otros países a quienes atañe el problema nuclear deberían crear un "equipo volante", que contara con una sección de investigación, medios para acciones contraterroristas y contraextorsión y un equipo para tomar las riendas ante la eventualidad de un desastre.

Podría objetársenos que estamos delirando, sobre todo si se parte de la resistencia que todavía se opone a reconocer la gravedad de la amenaza. Pero sería una tragedia que los gobiernos se vieran forzados a tomar medidas más radicales como consecuencia de una catástrofe nuclear.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

"POTATOES WERE GUARDED BETTER". Oleg Bukharin y William Potter en *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 51, n.º 3, páginas 46-50, mayo-junio 1995.

CHRONOLOGY OF NUCLEAR SMUGGLING INCIDENTS: JULY 1994-JUNE 1995. Paul N. Woessner en *Transnational Organized Crime*, vol. 1, n.º 2, páginas 288-329; verano 1995.

NUCLEAR MATERIAL TRAFFICKING: AN INTERIM ASSESSMENT. Phil Williams y Paul N. Woessner en *Transnational Organized Crime*, volumen 1, n.º 2, páginas 206-238, verano 1995.

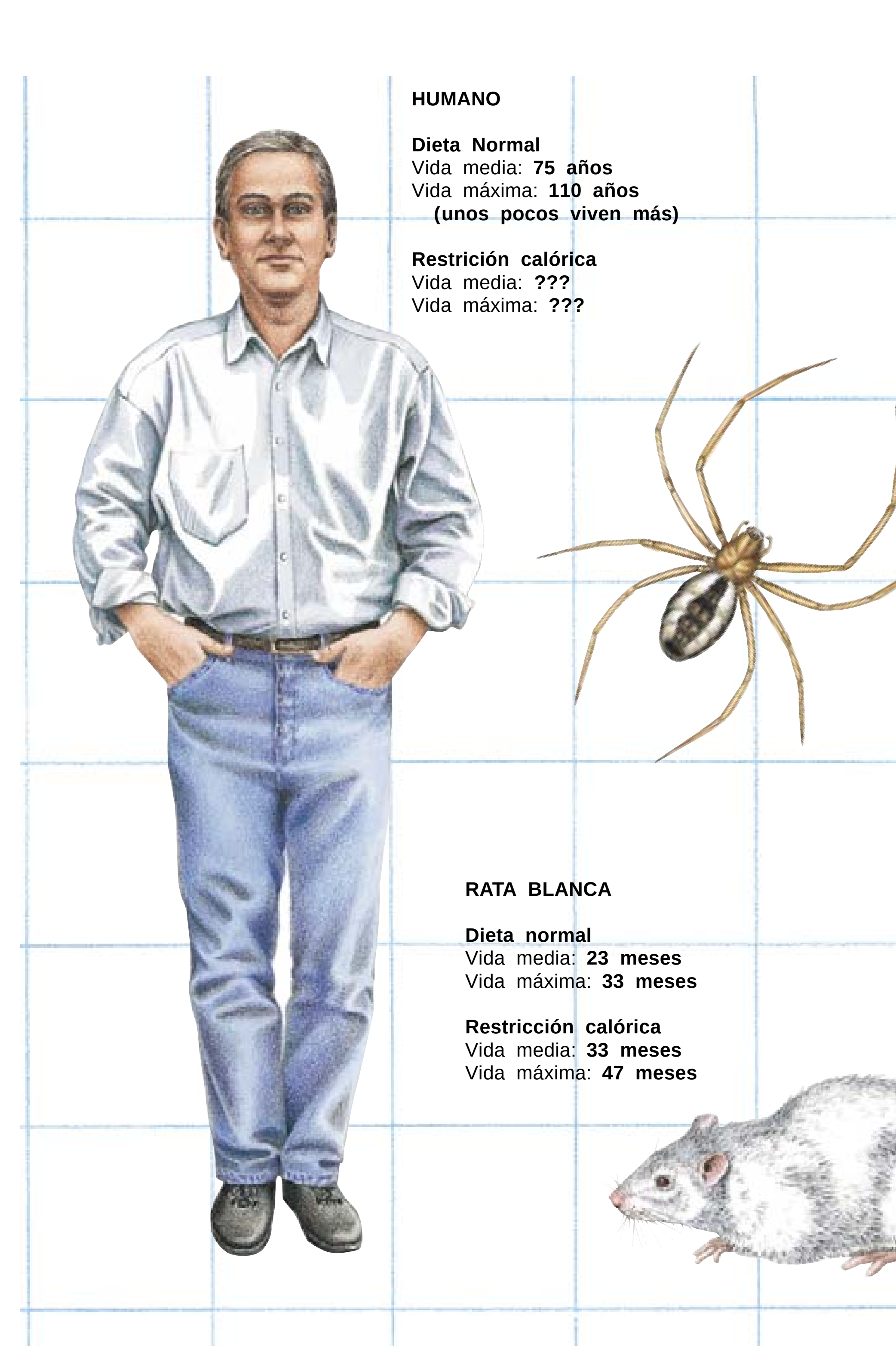
Restricción calórica y envejecimiento

Comer menos, pero con la garantía de tomar suficientes proteínas, grasas, vitaminas y minerales. Esta prescripción obra milagros en la salud y la longevidad de los roedores. ¿Ayudará también a los seres humanos?

Richard Weindruch

Hace sesenta años, en la Universidad de Cornell se realizó un extraordinario descubrimiento. El equipo de Clive M. McCay sometió a ratas experimentales a una dieta muy baja en calorías, y lograron con ello ampliar el límite superior de la vida de los animales en un 33 por ciento; el tope máximo, que está en los tres años, lo retrasaron a cuatro. Más adelante observaron que estas ratas mantenidas con dietas hipocalóricas alargaban su juventud y sufrían menos enfermedades propias de la edad avanzada que sus congéneres alimentados con una dieta normal. Desde los años treinta, la única medida que ha demostrado de forma convincente retardar el envejecimiento no sólo en los roedores (mamíferos como nosotros), sino también en una escala animal que va de los protozoos unicelulares a las lombrices intestinales, las moscas de la fruta y los peces, ha sido la restricción calórica.

Según era de esperar, la potencia evidenciada por el método plantea la cuestión de si prolongará también la vida y el estado de buena salud de las personas. Aunque el tema está abierto, el mero hecho de la eficacia mostrada en organismos dispares abona las posibilidades de una respuesta afirmativa. Además, la idea recibe respaldo complementario de ciertos resultados llamativos que



1. PROLONGACION de la esperanza de vida. Se ha conseguido, a menudo de una manera sustancial, mediante dietas muy bajas en calorías en una serie de animales, algunos de los cuales se muestran aquí. Queda por ver si la restricción calórica aumentará ese parámetro en los seres humanos. Las dietas restrictivas alcanzan dicho objetivo sólo si los animales reciben un suministro adecuado de nutrientes.

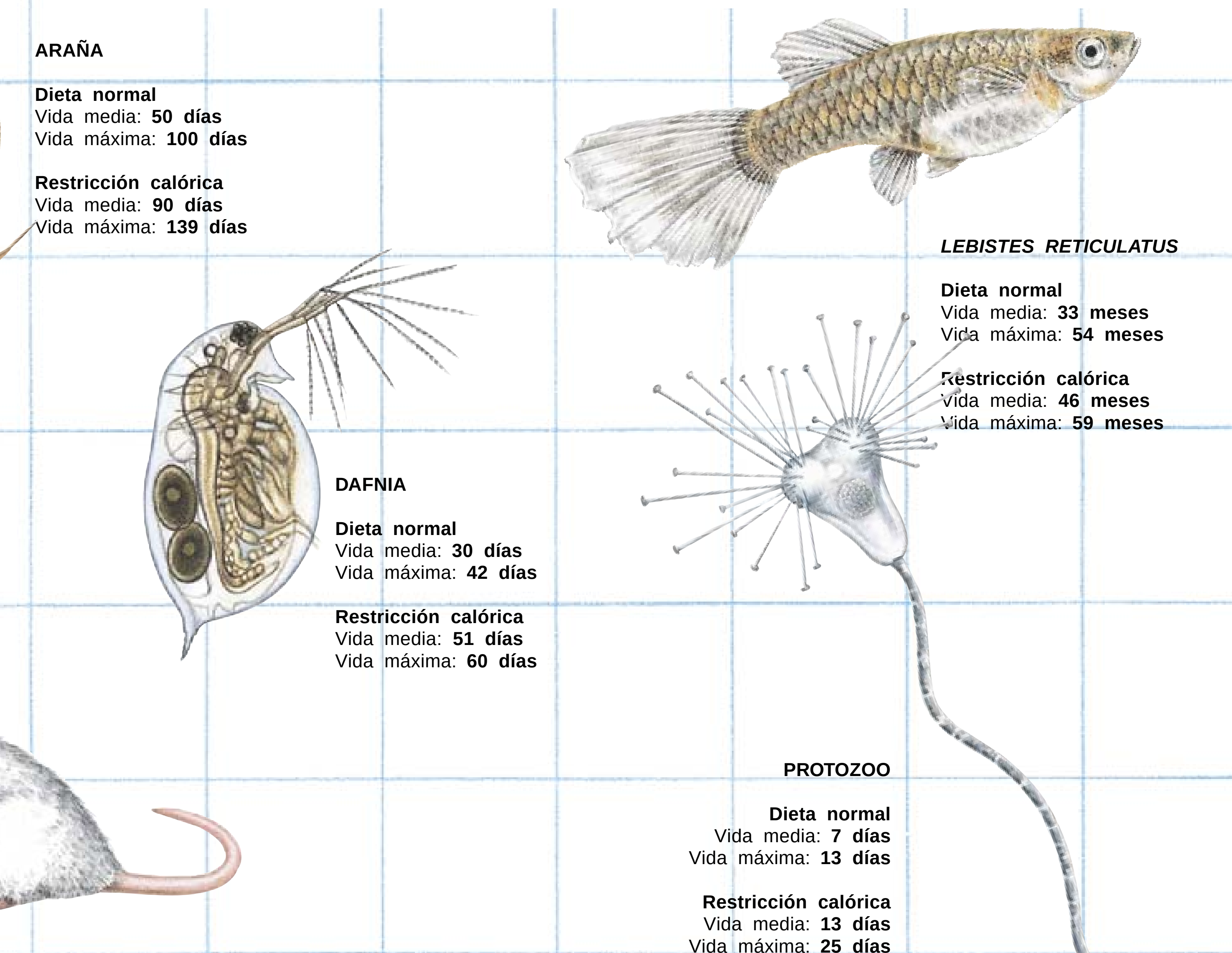
se han obtenido en investigaciones realizadas en monos y en humanos.

Por supuesto, aun cuando la austeridad calórica fuera nuestra fuente de juventud quizá no se ganaría el fervor popular. No tiene el hombre un buen historial de adhesión a dietas severas. Pero podrían desarrollarse algún día fármacos que ayudaran a controlar, con inocuidad y a largo plazo, nuestro apetito o remedar las influencias beneficiosas que la limitación de calorías ejerce sobre los tejidos del organismo. Este último enfoque nos permitiría consumir dietas regulares sin dejar de cosechar los saludables efectos derivados de restringir la ingesta alimentaria. En muchos laboratorios, entre ellos el nuestro de la Universidad de Winsconsin en Madison, se están investigando las bases moleculares y celulares de la influencia de la restricción calórica en el retraso del envejecimiento. Tal vez nuestros esfuerzos acaben aportando vías alternativas a la restricción de alimento; de momento, sin embargo, lo que a la mayoría nos guía es desentrañar el proceso (o procesos) del envejecimiento en sí mismo.

La investigación ha puesto al descubierto los múltiples beneficios que la restricción calórica aporta a los animales, siempre, claro está, que se respeten al máximo los requerimientos nutricionales de quienes siguen la dieta. En la mayoría de los estudios, los individuos sujetos a experimentación, por lo común ratas o ratones, consumen de un 30 a un 50 por ciento menos de calorías que las que ingieren los sujetos control; pesan, también, de un 30 a un 50 por ciento menos. Al propio tiempo, reciben las proteínas, grasas, vitaminas y minerales que demanda el funcionamiento eficaz de sus tejidos. En otras palabras, los animales siguen una dieta prudente llevada al límite, en la que reciben sólo las calorías que los salvan de la desnutrición.

Si se satisfacen las necesidades nutritivas, la restricción calórica aumentará, de forma consonante, no sólo el promedio de vida de la población, sino también la duración máxima (es decir, la esperanza máxima de vida de los miembros más longevos del grupo). Esta segunda consecuencia supone que la restricción calórica restaña algunos procesos básicos del envejecimiento. Todo lo que impida la muerte prematura, como la causada por accidente o por enfermedad evitable o tratable, aumentará el promedio de vida de una población. Pero hay que frenar el ritmo de envejecimiento si se quiere que los individuos resistentes sobrepasen el máximo actual.

Además de modificar al alza la esperanza de vida, las dietas bajas en calorías han aplazado en los roedores la mayoría de las enfermedades graves que suelen presentarse en edades avanzadas; por ejemplo, los cánceres de mama, próstata, sistema inmunitario y tracto gastrointestinal. Por otro lado, de los aproximadamente 300 indicadores de envejecimiento que se han medido, un 90 por ciento de los mismos mantiene, en los roedores sometidos a restricción calórica, valores "más jóvenes" durante más tiempo



que en los bien alimentados. Así, ciertas respuestas inmunitarias decaen en los ratones normales de un año (madurez), pero no lo hacen en los ratones más delgados, aunque genéticamente idénticos, hasta los dos años de edad. De igual forma, a medida que los ratones envejecen suelen eliminar la glucosa (un azúcar de estructura simple) que portan en la sangre con menor eficacia que en su juventud (cambio que puede desembocar en diabetes); además, se demoran más en la síntesis de las proteínas necesarias, experimentan mayor entrecruzamiento (y, por tanto, mayor rigidez) en las proteínas hísticas de larga duración, pierden masa muscular y aprenden más despacio. En los animales sometidos a restricción calórica, todos estos cambios se postergan.

Por consiguiente, a nadie sorprenderá que los investigadores se plantearan si las ventajas dimanantes de las dietas bajas en calorías se debían a la propia restricción calórica (energética) o si tal éxito correspondía a la limitación de grasas o algún otro componente de la dieta. Se ha comprobado que la hipótesis primera es la correcta. La restricción en grasas, proteínas o carbohidratos sin reducción calórica no aumenta la vida máxima de los roedores. La simple complementación con complejos polivitamínicos o con elevadas dosis de antioxidantes no sirve, ni tampoco la modificación del tipo de grasa, proteína o carbohidratos de la dieta.

Los estudios sugieren también, y esto es alentador, que la restricción calórica puede ser útil aun cuando no

Beneficios de la restricción calórica

Desde comienzos del siglo los avances registrados en las prácticas sanitarias de los norteamericanos han tenido mucho que ver en el aumento de su promedio de vida (*a*), sobre todo al mejorar la prevención y el tratamiento de las enfermedades que interrumpen prematuramente la existencia. Pero esas intervenciones no han afectado de manera significativa a la duración máxima de la vida, que se cree determinada por procesos de envejecimiento intrínsecos. (Las curvas y los datos de la gráfica muestran proyecciones para las personas nacidas en los años indicados y se han calculado suponiendo que no cambian las condiciones que influyen en la pervivencia.) La restricción calórica, por el contrario, ha aumentado la esperanza máxima de vida, tanto como la media, en roedores (*b*); se trata de la única práctica que ha demostrado retardar el envejecimiento en mamíferos, señal de que el envejecimiento en humanos podría demorarse también.

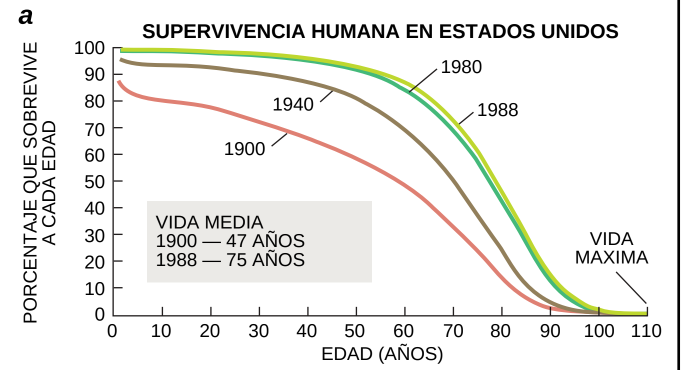
Aunque las dietas severas amplían la pervivencia más que las moderadas, un estudio de ratones alimentados desde edad temprana (tres semanas) con una dieta reducida en calorías demuestra que hasta las restricciones ligeras reportan algún beneficio (*c*). Este hallazgo es una noticia prometedora para las personas. También es alentador el descubrimiento de que la restricción calórica en roedores no se limita a prolongar la vida: los animales a ella sometidos permanecen jóvenes más tiempo (*tabla*). La hembra que se muestra tenía 53 meses cuando se tomó esta fotografía y murió de causas desconocidas un mes más tarde. La mayoría de los ratones de su raza que siguen una dieta normal mueren a los 40 meses.

RESTRICCION DE CALORIAS EN ROEDORES: EFECTOS SELECCIONADOS

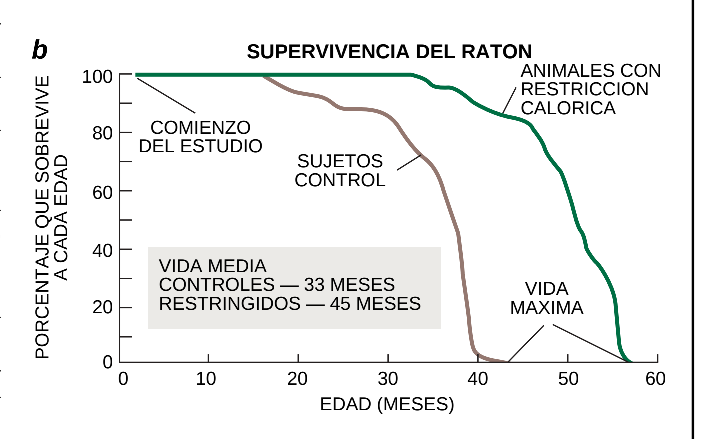
Retrasa las disminuciones relacionadas con la edad de: control de glucosa en sangre; fecundidad en las hembras; reparación del ADN; inmunidad; capacidad de aprendizaje; masa muscular; síntesis de proteínas

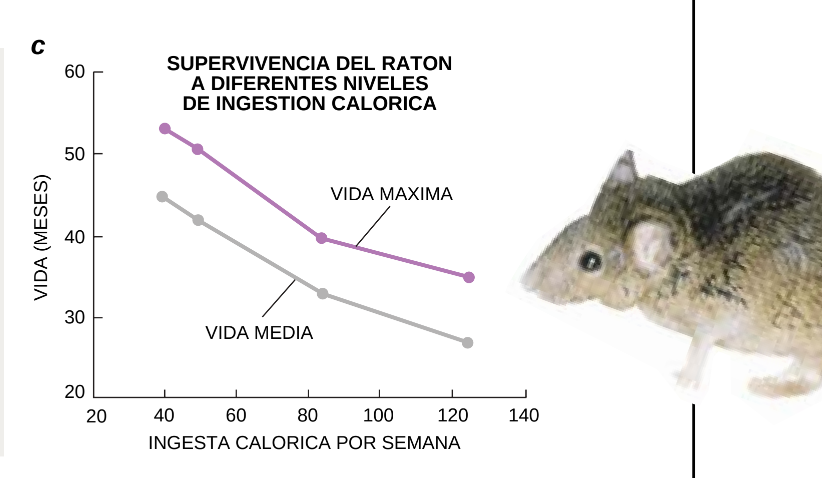
Demora los aumentos relacionados con la edad de: entrecruzamiento de proteínas de larga duración; producción de radicales libres por las mitocondrias; lesión oxidativa hística sin restañar

Retrasa el inicio de las enfermedades que aparecen en la senectud, entre ellas: alteraciones autoinmunitarias; cánceres; cataratas; diabetes; hipertensión; insuficiencia renal



FUENTE: Oficina del Censo de EE.UU.; Centro Nacional de Estadística Sanitaria





se inicie hasta la mediana edad. De hecho, el descubrimiento más excitante de toda mi carrera ha sido el de que la restricción calórica iniciada en ratones que entraban en el ecuador de su existencia extendía la esperanza de vida de un 10 a un 20 por ciento y se oponía al desarrollo de cáncer. Además, aunque la limitación de la ingesta calórica hasta alrededor de la mitad de la consumida por los animales que se alimentan libremente retrasa al máximo la cota superior de la pervivencia, una restricción menos drástica también proporciona algún beneficio, se haya empezado al principio de la vida o más tarde.

Para poder afirmar que la restricción alimentaria retrasará forzosamente el envejecimiento en el ser humano, habrá que confirmar los resultados de los roedores en monos (que tienen un parecido más estrecho con los humanos) o en miembros de nuestra propia especie. Y para que esas investigaciones proporcionen información de mayor fuste, deberán incluir un seguimiento de muchos años (empresa cara y de logística difícil). Pese a todo, se están desarrollando ya dos importantes ensayos en monos.

Es demasiado pronto para saber si las dietas bajas en calorías prolongarán la vida o la juventud de los monos. Pero sí se han podido medir los efectos de la restricción calórica en los indicadores biológicos del envejecimiento: parámetros que suelen cambiar con la edad y podrían contribuir a predecir la duración futura del intervalo de buena salud y la esperanza de vida. En este contexto, sabido es que, conforme los primates envejecen, su presión arterial y sus niveles sanguíneos de insulina y glucosa se elevan; al mismo tiempo, disminuye la sensibilidad a la insulina (la capacidad de las células para captar glucosa en respuesta a las señales emanadas de la insulina). El aplazamiento de esos cambios podría significar que la dieta experimental está reduciendo el ritmo de envejecimiento, al menos en algunos de sus aspectos.

De las dos investigaciones que se están llevando a cabo en monos, la dirigida por George S. Roth comenzó en 1987. Se examinan monos rhesus, que suelen llegar hasta unos 30 años, aunque a veces alcanzan los 40, y monos ardilla, que rara vez sobrepasan los 20 años. Algunos animales iniciaron la restricción dietética en la juventud (al año o a los dos años de edad); otros, entrados ya en la pubertad. El segundo proyecto lo encabezan William B. Ershler, Joseph W. Kemnitz y Ellen B. Roecker. Centrado sólo en monos rhesus, el experimento empezó en 1989; yo me uní a ese equipo un año después. Nuestros monos se sometieron a la dieta de restricción calórica en plena juventud, entre ocho y catorce años de edad. En uno y otro trabajo, la restricción calórica impuesta es alrededor de un 30 por ciento inferior a la ingesta de los controles, que se alimentan sin ningún tipo de menoscabo.



2. ESTOS DOS RATONES TIENEN LA MISMA EDAD: 40 meses. Sin embargo, comparado con el animal de la derecha alimentado con una dieta normal, el de la izquierda, que ha sido criado en una dieta baja en calorías desde los 12 meses (principio de la madurez), parece más joven y está más sano.

Los resultados provisionales obtenidos hasta ahora son prometedores. En uno y otro proyecto, los animales sometidos a dieta se muestran sanos y felices, aunque ansiosos a la hora de comer; sus cuerpos parecen responder al régimen de forma muy similar a lo observado en los roedores. La presión arterial y los niveles de glucosa son menores que en los animales control; la sensibilidad a la insulina, mayor. Los niveles de insulina en sangre son también menores.

No se han acometido investigaciones sistemáticas sobre los efectos de la restricción calórica a largo plazo en humanos de peso medio. Los datos relativos a poblaciones que se han visto forzadas por la pobreza a vivir con escasas calorías no aportan información significativa, puesto que tampoco reciben las cantidades adecuadas de nutrientes esenciales. Pese a ello, algunos estudios sobre ciertas poblaciones ofrecen pruebas indirectas de la eficacia de la restricción calórica. Pensemos en los habitantes de Okinawa, muchos de los cuales consumen dietas bajas en calorías, si bien provistas de los nutrientes necesarios. La incidencia de centenarios en la isla multiplica por 40 la de cualquier otra del archipiélago nipón. En otro orden y de acuerdo con los resultados publicados de estudios epidemiológicos realizados en EE.UU. y en otros países, ciertos cánceres, sobre todo los de mama, colon y estómago, aparecen con menos frecuencia en personas que consumen pocas calorías.

Se obtuvieron asimismo resultados interesantes en el examen de las ocho personas que participaron en el experimento *Biosfera* 2, en Tucson; instaladas en un entorno autoabastecido, se vieron obligadas a recortar notablemente su ingesta durante dos años al ser menor de lo esperado la producción de alimentos en el hábitat. Se ha cuestionado el valor científico de ese proyecto, pero quienes nos sentimos interesados en los efectos de las dietas bajas en calorías contamos con la fortuna de que el médico del equipo fuera Roy L. Walford, experto en restricción calórica y envejecimiento (y mi mentor en estos lances). Walford ayudó a sus compañeros a evitar la desnutrición y llevaba el registro de varios aspectos de la fisiología del grupo. Sus análisis revelaron que la restricción calórica inducía una caída de la presión arterial y de los niveles de glucosa: las dos secuelas observadas en roedores y monos. El colesterol sérico total disminuyó también.

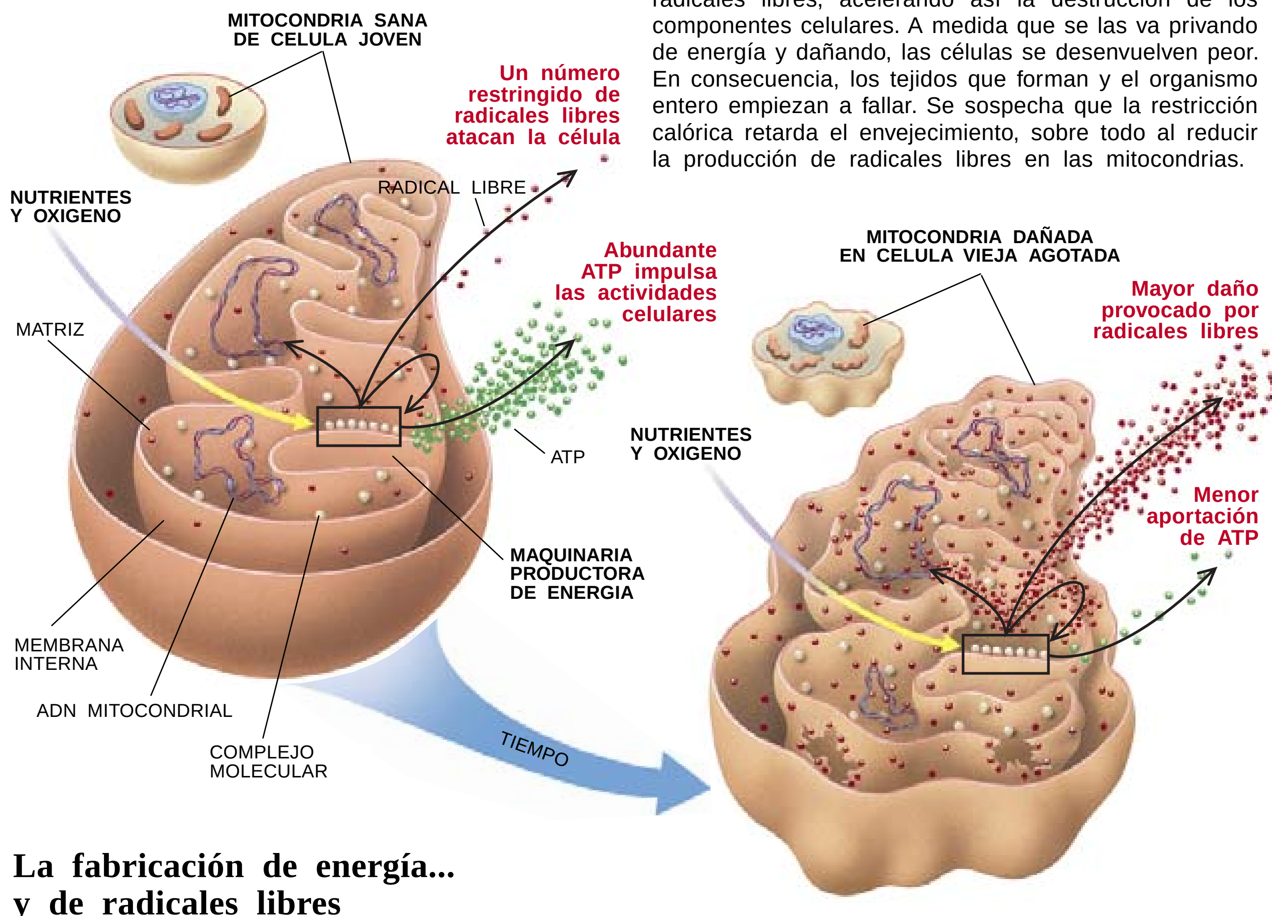
Aunque se les conceda un carácter provisional a los resultados obtenidos en monos y humanos, los datos derivados de los estudios con roedores demuestran sin ambages que la restricción calórica ejerce múltiples efectos

RICHARD WEINDRUCH enseña en la Universidad Wisconsin en Madison, donde codirige un instituto sobre el envejecimiento.

Una teoría sobre el envejecimiento

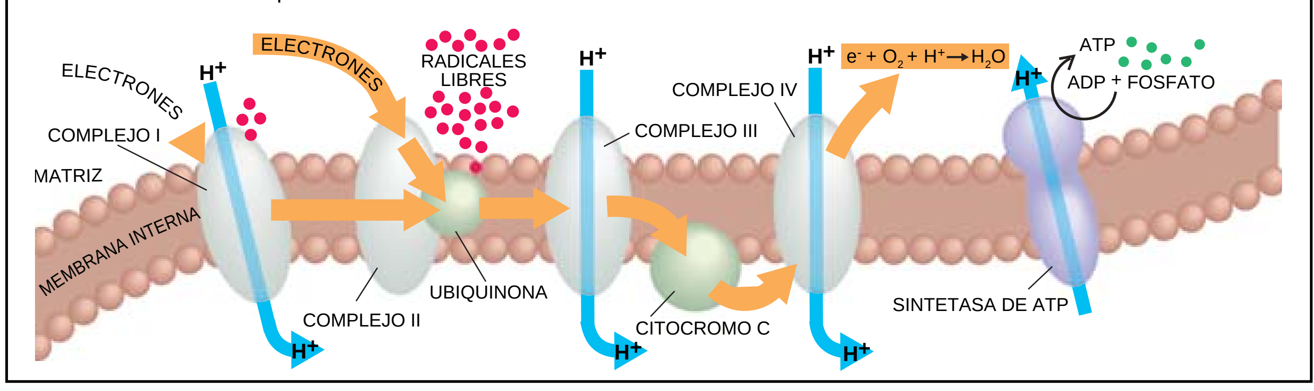
De acuerdo con la doctrina más aceptada, envejecemos por culpa, en buena parte, de la labor destructiva de los radicales libres (*rojo*) producidos en las mitocondrias. Los radicales se forman (*izquierda*) cuando la maquinaria productora de energía de las mitocondrias (*recuadro negro*) usa el oxígeno y los nutrientes para sintetizar ATP, la molécula (*verde*) que aporta el combustible para la mayoría de las actividades celulares. Esos radicales atacan, y quizá lesionan para siempre, la propia maquinaria y el ADN mitocondrial que es necesario para construir partes de dicho mecanismo. También pueden dañar otros componentes mitocondriales y celulares.

La teoría sugiere que, con el tiempo (*derecha*), el daño acumulado en las mitocondrias comporta la caída de síntesis de ATP. E insta una mayor producción de radicales libres, acelerando así la destrucción de los componentes celulares. A medida que se las va privando de energía y dañando, las células se desenvuelven peor. En consecuencia, los tejidos que forman y el organismo entero empiezan a fallar. Se sospecha que la restricción calórica retarda el envejecimiento, sobre todo al reducir la producción de radicales libres en las mitocondrias.



La fabricación de energía... y de radicales libres

La maquinaria mitocondrial de producción energética consiste fundamentalmente en la cadena de transporte de electrones: una serie de cuatro complejos moleculares grandes (*gris*) y dos pequeños (*verde claro*). Los complejos I y II (*izquierda*) captan del alimento electrones (*flechas color oro*) y los hacen llegar a la ubiquinona, el lugar de mayor generación de radicales libres (*rojo*). La ubiquinona envía los electrones en sentido descendente por el resto de la cadena hasta el complejo IV, donde interaccionan con el oxígeno y el hidrógeno para formar agua. El flujo de electrones induce la corriente de protones (H^+) (*flechas azules*) a otro complejo —la sintetasa de ATP (*morado*)— que extrae la energía suministrada por los protones para fabricar ATP (*verde oscuro*). Los radicales libres se forman cuando los electrones se escapan de la cadena de transporte y se combinan con el oxígeno de su vecindad.



beneficiosos. Tamaña diversidad representa, empero, un problema para los investigadores: de los múltiples cambios registrados, ¿cuál contribuye más (en el supuesto de que lo haga alguno) a aumentar la longevidad y la juventud? No existe acuerdo entre los expertos. Pero sí han descartado propuestas que antaño se consideraron viables. Por ejemplo, se sabe que una ingesta baja en energía retrasa el crecimiento y reduce la cantidad de grasa del organismo. Estos dos efectos compitieron, tiempo atrás, por arrogarse la primacía del cambio que conducía a la longevidad; ya nadie los defiende.

Se siguen estudiando otras hipótesis. Todas cuentan con algún respaldo experimental. A tenor de una de ellas, la restricción calórica reduce la tasa de división celular en muchos tejidos. Dado que la proliferación descontrolada de las células es un signo patognomónico del cáncer, este cambio permitiría explicar, en principio, por qué disminuye, en los animales alimentados con dietas bajas en calorías, la incidencia de varios cánceres característicos de las etapas finales de la vida. Otra propuesta se basa en el hallazgo de que la restricción calórica tiende a reducir los niveles de glucosa en sangre. Un menor nivel de glucosa circulante disminuiría la tasa de acumulación de azúcar en las proteínas de larga duración y moderaría, por tanto, los efectos destructivos de tal concentración.

Ahora bien, la teoría que hasta el presente ha recabado el apoyo más sólido sostiene que la restricción calórica retarda la esperanza de vida y el vigor corporal por la razón principal de que labora contra el daño que los radicales libres infligen en las mitocondrias. Estos orgánulos son diminutas estructuras citoplasmáticas que actúan como centrales energéticas de las células. Los radicales libres son moléculas muy reactivas (derivadas por lo común del oxígeno) que portan un electrón desapareado en su superficie. En ese estado, las moléculas tienden a oxidar destructivamente cualquier compuesto que les salga al paso, es decir, a arrebatarle electrones. Desde los años cincuenta se viene sospechando que los radicales libres contribuyen al envejecimiento. Por entonces, Denham Harman sugirió que la producción de radicales libres en el curso del metabolismo normal disgregaba gradualmente las células. Pero hubo que esperar hasta los ochenta para percibir que las mitocondrias eran, probablemente, los blancos atacados con mayor agresividad.

La hipótesis que atribuye el envejecimiento a los radicales libres mitocondriales se funda, en parte, en el conocimiento de la síntesis de ATP (trifosfato de adenosina) en las mitocondrias. Esta molécula abastece de energía a la mayoría de los procesos celulares, como el bombeo de iones a través de las membranas, la contracción de las fibras musculares y la síntesis de proteínas. Se forma ATP a través de una secuencia muy complicada de reacciones; en esencia, precisa de la actividad de una serie de complejos moleculares incrustados en la membrana interna de las mitocondrias. Con la ayuda del oxígeno, los complejos extraen energía de los nutrientes y usan esa energía para fabricar ATP.

Por desgracia, la maquinaria mitocondrial que extrae energía de los nutrientes también produce radicales libres como producto secundario. La verdad es que se responsabiliza a las mitocondrias de la mayoría de los radicales libres presentes en las células. Uno de esos productos secundarios es el radical superóxido ($O_2^{\cdot -}$). (El punto de la fórmula representa el electrón desapareado.) Este metabolito renegado es destructivo por derecho propio; además, puede convertirse en peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que, si bien no es un radical libre desde el punto de vista técnico, puede formar con facilidad un radical libre extremadamente agresivo: el hidroxilo ($OH^{\cdot -}$).

Una vez constituidos, los radicales libres pueden atacar proteínas, lípidos y ADN de cualquier parte de la célula. Pero se cree que los más vulnerables son los componentes de las mitocondrias (incluidos la maquinaria sintetizadora de ATP y el ADN mitocondrial que cifra parte de esos mecanismos). Según cabe suponer, en parte se hallan en peligro porque residen en la zona, o aledaños, donde se generan los radicales libres, y reciben, por tanto, el incesante bombardeo de los agentes oxidantes. Además, el ADN mitocondrial carece del escudo proteico que protege de los agentes destructivos al ADN nuclear. Opinión que encaja con la observación según la cual el ADN mitocondrial sufre mucho más daño oxidativo que el ADN nuclear extraído del mismo tejido.

Los defensores de la hipótesis que ve en los radicales libres mitocon-

DIETA NORMAL

- **Ingesta alimentaria:** 688 calorías al día
- **Peso corporal:** 14 kg
- **Peso correspondiente a la grasa:** 25%

PARAMETROS DE SALUD

- **Presión arterial: 129/60** (sístole/diástole)
- **Nivel de glucosa: 71** (miligramos por decilitro de sangre)
- **Nivel de insulina: 93** (microunidades por mililitros de sangre)
- **Triglicéridos: 169** (miligramos por decilitro de sangre)



3. LOS RESULTADOS DEL ENSAYO sobre restricción calórica que se está llevando a cabo en monos rhesus no permiten revelar si la limitación de calorías prolongará la esperanza de vida. Pero la comparación de un grupo control (*izquierda*) con animales sometidos a una dieta estricta (*derecha*) después de cinco años indica que al menos algunos parámetros biológicos que suelen elevarse con la edad cambian más despacio en los animales de prueba.

driales la causa del envejecimiento sugieren que la lesión que provocan en la mitocondria acaba minando la formación de ATP y fomenta la producción de radicales libres. El incremento de éstos acelera, a su vez, la lesión oxidativa de los componentes mitocondriales, lo que refuerza la inhibición de la síntesis de ATP. Pero los radicales libres atacan también otros componentes celulares, no sólo las mitocondrias; fenómeno que degrada aún más el funcionamiento de las células. Al par que merma el rendimiento de las células, decae también el de tejidos y los órganos de los que forman parte, y el propio organismo deviene menos capaz de afrontar los retos que cuartean su estabilidad. El organismo intenta contrarrestar los efectos nocivos de los agentes oxidantes. Las células poseen enzimas antioxidantes, que detoxifican los radicales libres, y fabrican otras enzimas que reparan el daño oxidativo. Ninguno de esos sistemas es eficaz al 100 por cien, sin embargo; de ahí la probabilidad de que la lesión se acumule con el tiempo.





4. LA COMIDA de una persona que sigue una dieta de unas 2000 calorías (*arriba*) podría reducirse considerablemente —en una tercera parte de las calorías (*abajo*)— si se quiere seguir un régimen de restricción calórica.

La hipótesis de que el envejecimiento resulta en buena medida de la lesión inducida por los radicales libres en las mitocondrias y en otros componentes celulares se ha visto corroborada por una serie de hallazgos. En un ejemplo impresionante, el equipo de Rajindar S. Sohal y William C. Orr investigó roedores y otros organismos, entre ellos moscas de la fruta, moscas domésticas, cerdos y vacas. Observaron que, con la edad, aumentaban la generación de radicales libres en las mitocondrias y los cambios oxidativos causados en la membrana mitocondrial interna (donde se sintetiza el ATP) y en las proteínas y el ADN mitocondriales. En varias de las especies descubrieron también una correlación entre el ritmo más intenso de producción de radicales libres y el acortamiento de la esperanza y del promedio de vida.

Con la edad, disminuye asimismo la fabricación de ATP en el cerebro, el corazón y el músculo esquelético; no otra cosa cabría esperar si las proteínas y el ADN mitocondriales de esos tejidos se hallaran irreparablemente dañados por los radicales libres. Un fenómeno de degradación semejante se advierte en los tejidos humanos, que tal vez ayude a explicar por qué las enfermedades degenerativas del sistema nervioso y del corazón menudean en edad avanzada y por qué los músculos pierden masa y se debilitan.

Debemos al grupo de Sohal una aportación importante entre las pruebas más sólidas de la hipótesis según la cual la restricción de calorías retarda el envejecimiento al operar contra la lesión oxidativa de las mitocondrias. Sohal y sus colaboradores examinaron mitocondrias procedentes del cerebro, el corazón y el riñón de ratones. Hallaron que los niveles del radical superóxido y del peróxido de hidrógeno en los animales sometidos a restricción calórica durante un plazo dilatado eran bastante inferiores que en los controles alimentados normalmente. Además, en el grupo experimental la restricción calórica ponía freno al aumento significativo de producción de radicales libres que, con la edad, aparecía en los grupos control. Este efecto mitigador iba acompañado de una menor lesión oxidativa en proteínas y ADN mitocondriales. Según otro trabajo, la restricción de calorías ayuda a evitar los cambios relacionados con la edad que se operan en las actividades de ciertas enzimas antioxidantes (aunque muchos investigadores, entre los que me cuento, sospechan que la razón principal de la disminución observada en la gravedad del daño atribuido a la oxidación resulta, en buena medida, de la caída en la producción de radicales libres).

¿A través de qué mecanismos podría la restricción calórica reducir la generación de radicales libres? Se ignora. Para algunos, puede que una menor ingesta de calorías induzca un menor consumo de oxígeno en las mitocondrias (en general o en tipos celulares seleccionados). Según otros, gracias las dietas bajas en calorías las mitocondrias aprovecharían mejor el oxígeno que utilizan, lo que redundaría en una menor formación de radicales libres por unidad de oxígeno consumido. Cabe suponer que un menor consumo (o un uso más eficaz) de oxígeno comportaría la producción de menos radicales libres. Datos recientes llevan a pensar también que el control calórico podría reducir la generación de radicales libres en las mitocondrias al rebajar los niveles de triyodotironina, o T_3, una hormona tiroidea del torrente circulatorio.

La prudencia aconseja no aplicar en humanos un régimen severo de restricción de calorías hasta que no progrese más la investigación en primates. Lo que no significa que no debamos extraer determinadas lec-

ciones de los hallazgos acumulados para una posible aplicación futura de tales programas.

Una primera consecuencia: si consideramos que un recorte drástico de alimento retrasa el crecimiento en los roedores jóvenes, tal medida sería probablemente perjudicial para los niños. Además, dado que los niños no toleran el hambre igual que los adultos, se mostrarían, a buen seguro, más sensibles a cualquier efecto negativo todavía desconocido de una dieta baja en calorías (pese a que restricción calórica no es lo mismo que hambre). El comienzo de la dieta en torno a los 20 años evitaría esos inconvenientes y probablemente proporcionaría la mayor esperanza de vida.

Hay que prestar atención también al progreso pautado en la restricción de calorías. En un comienzo, los investigadores no conseguían prolongar la pervivencia de las ratas si establecían dicho control de la dieta en los adultos. Sospecho que el fracaso se debía a que los animales se pusieron a régimen de forma súbita, recibieron poquísimas calorías o ambas cosas. Trabajando con ratones de un año, hemos observado que una disminución progresiva y gradual de las calorías hasta un 65 por ciento de la cuantía normal aumentaba la esperanza de vida.

¿Podemos acordar una ingesta de calorías apropiada para el hombre? Extrapolar a partir de los ratones es arriesgado. Sin embargo, algunos datos dan pie para admitir que muchas personas harían mejor en consumir una cantidad que les permitiera pesar de un 10 a un 25 por ciento menos de su "punto establecido" personal. En esencia, este punto es el peso que el cuerpo está "programado" para mantener, si no se come en respuesta a estímulos externos, como los anuncios de televisión. El problema que se nos plantea es la determinación del "punto establecido" de cada individuo, una tarea harto delicada. Para obviar esa dificultad, los dietólogos y endocrinólogos podrían emplear un sistema empírico para encontrar el nivel calórico que reduzca en una cantidad predeterminada el nivel de glucosa o de colesterol en sangre.

De la investigación en animales se infiere, además, que un régimen de restricción calórica razonable en humanos podría suponer una ingesta diaria de alrededor de un gramo de proteínas y no más de medio gramo de grasa por cada kilogramo de peso actual. La dieta incluiría también carbohidratos complejos (cadenas largas de azúcares, que abundan en frutas y verduras) en suficiente cuantía para alcanzar el nivel deseado de calorías. Para conseguir las raciones diarias recomendadas de todos los nutrientes esenciales, un individuo debería seleccionar los alimentos con sumo cuidado y probablemente tomar vitaminas u otros suplementos.

Quien se propusiera seguir un régimen con restricción calórica tendría que considerar también sus inconvenientes potenciales, amén de las punzadas del hambre. Siempre, por supuesto, bajo la orientación de un médico. El grado de severidad de la dieta podría acarrear una pérdida de peso que tal vez impidiera la fecundidad en las mujeres. Además, un estado anovulatorio prolongado, si se acompaña de una disminución de la producción de estrógenos, podría aumentar el riesgo de osteoporosis y pérdida de masa muscular a una edad avanzada. No debe descartarse que la restricción calórica comprometa la capacidad de la persona para resistir el estrés, como el derivado de lesiones, infecciones o exposición a temperaturas extremas. Por extraño que parezca, apenas si se ha estudiado la resistencia al estrés en los roedores sometidos a dietas bajas en calorías, y en consecuencia contamos con pocos elementos de juicio.

Podrían pasar otros 10 o 20 años antes de que la ciencia alcance un conocimiento claro de si la restricción calórica puede aportar a los humanos las ventajas que se ha demostrado ofrece a ratas, ratones y otros organismos. Mientras tanto, los investigadores confían en llegar a entender la naturaleza del envejecimiento y dominar los procesos para retardarlo, ya sea a través de la restricción calórica, a través de fármacos que reproduzcan los efectos de la dieta o a través de otros métodos todavía por descubrir.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE RETARDATION OF AGING AND DISEASE BY DIETARY RESTRICTION. Richard Weindruch y Roy L. Walford. Charles C. Thomas, 1988.

FREE RADICALS IN AGING. Dirigido por Byung P. Yu. CRC Press, 1993.

MODULATION OF AGING PROCESSES BY DIETARY RESTRICTION. Dirigido por Byung P. Yu. CRC Press, 1994.

Futuro de la industria de los semiconductores

Tal vez estén contados los días de desarrollo vertiginoso, pero ello puede obligar a los fabricantes a ofrecer una diversidad mayor

G. Dan Hutcheson y Jerry D. Hutcheson

La capacidad de almacenar y procesar información de mil maneras ha sido esencial para el progreso de la humanidad. Desde las remotas incisiones en arcilla de las tablillas sumerias hasta la imprenta de Gutenberg, el sistema decimal de Dewey y los semiconductores, el almacenamiento de la información ha constituido el catalizador de sistemas legales, políticos y sociales de complejidad creciente. También la ciencia moderna está estrechamente vinculada al procesamiento de la información, con el cual mantiene cierta simbiosis. Los avances científicos han permitido almacenar, extraer y procesar cada vez más información, gracias a cuyo bagaje se han producido nuevos progresos.

La fuerza motriz de este empeño decisivo, la que abrió una nueva era en los últimos decenios, fue la electrónica de semiconductores. Los circuitos integrados originaron no sólo ordenadores personales que han transformado el mundo empresarial, sino también sistemas de control para el mejor funcionamiento de las máquinas y sistemas de ayuda médica que salvan vidas humanas. De paso, han hecho brotar industrias que cifran sus ingresos en billones de pesetas y dan trabajo a millones de personas. Estas y otras muchas ventajas derivan, en buena parte, de la capacidad de integrar cada vez más transistores en una pastilla ("chip"), a unos costes en continuo descenso.

Esa capacidad, sin precedentes en la industria, se halla tan arraigada en el sector de los semiconductores, que se toma como una auténtica ley. No obstante, de vez en cuando se expresan temores de que los obstáculos técnicos y económicos lleguen pronto a frenar la evolución. Muchas veces los expertos han vaticinado el inminente fin del espectáculo, pero la creatividad y el ingenio de otros colegas han echado por tierra sus predicciones.

En este momento, cuando el coste de construir una nueva planta de semiconductores roza el billón y la densidad de transistores se aproxima a los límites teóricos impuestos por las técnicas utilizadas, muchos se preguntan qué va a ocurrir a la industria cuando finalmente tropiece con barreras de veras insalvables.

En 1964, a los seis años de la invención del circuito integrado, Gordon Moore observó que el número de transistores que podían integrarse en una pastilla se duplicaba a un ritmo anual. Moore, uno de los fundadores de Intel Corporation en 1968, predijo con acierto que esa tasa se mantendría en el futuro inmediato, lo que ha venido a llamarse ley de Moore y ha traído consecuencias de largo alcance.

Dado que la densidad doble no implicaba mayor inversión, el coste por transistor se reducía a la mitad en cada tanda de duplicación. Al multiplicar por dos los transistores, la pastilla de memoria puede almacenar el doble de datos. Con mayores niveles de integración se puede aunar un mayor número de funciones en la pastilla; una disposición espacial comprimida de los componentes, de los transistores por ejemplo, facilita una interacción más célere. Los usuarios han podido así obtener por el mismo dinero una potencia informática acrecentada, lo que ha estimulado tanto las ventas de microcircuitos como la demanda de potencias de procesamiento crecientes.

Para asombro de muchos expertos, incluso del propio Moore, la integración continuó creciendo a un ritmo sorprendente. Cierto es que, al final de los setenta, se había desacelerado el paso; el número de transistores se duplicaba cada 18 meses. Pero desde entonces el ritmo se ha mantenido y hoy en día existen en el mercado circuitos integrados con más de seis millones de transistores y componentes electrónicos de 0,35 micrometros de dimensión transversal. Se espera que se vendan pronto pastillas con diez millones o más transistores y de 0,25 e incluso de 0,16 micrometros.

No vaya a creerse que ha sido fácil llegar hasta los microcircuitos actuales; los fabricantes han tenido que superar, en una carrera erizada de obstáculos, notables limitaciones en sus equipos y procesos de producción. Ninguno de estos problemas resultó ser la temida barrera final cuya superación exigiera costes tan elevados como para detener o por lo menos frenar el avance de la técnica y, por tanto, el desarrollo de este sector industrial. Los sucesivos impedimentos, empero, han sido cada vez más imponentes por razones li-

G. DAN HUTCHESON y JERRY D. HUTCHESON han consagrado su vida profesional al progreso de la fabricación de semiconductores. Jerry, físico de formación, trabajó desde 1959 en RCA, Motorola y otras empresas. En 1976 fundó la compañía consultora VLSI Research, Inc. Su interés se centra en las interacciones de la técnica y la economía en la fabricación de semiconductores. Su hijo Dan es economista. En 1981 desarrolló el primer modelo de simulación basado en costos del proceso de fabricación para orientar a las empresas en la elección del equipo necesario.



1. MAQUETA DE CIRCUITOS. Registra el diseño de una pastilla (“chip”). Las distintas capas de la pastilla se muestran en colores diferentes. La imagen ilustra parte de los planos del futuro microprocesador Power PC 620 de Motorola.

gadas a las técnicas en que se funda la fabricación de semiconductores.

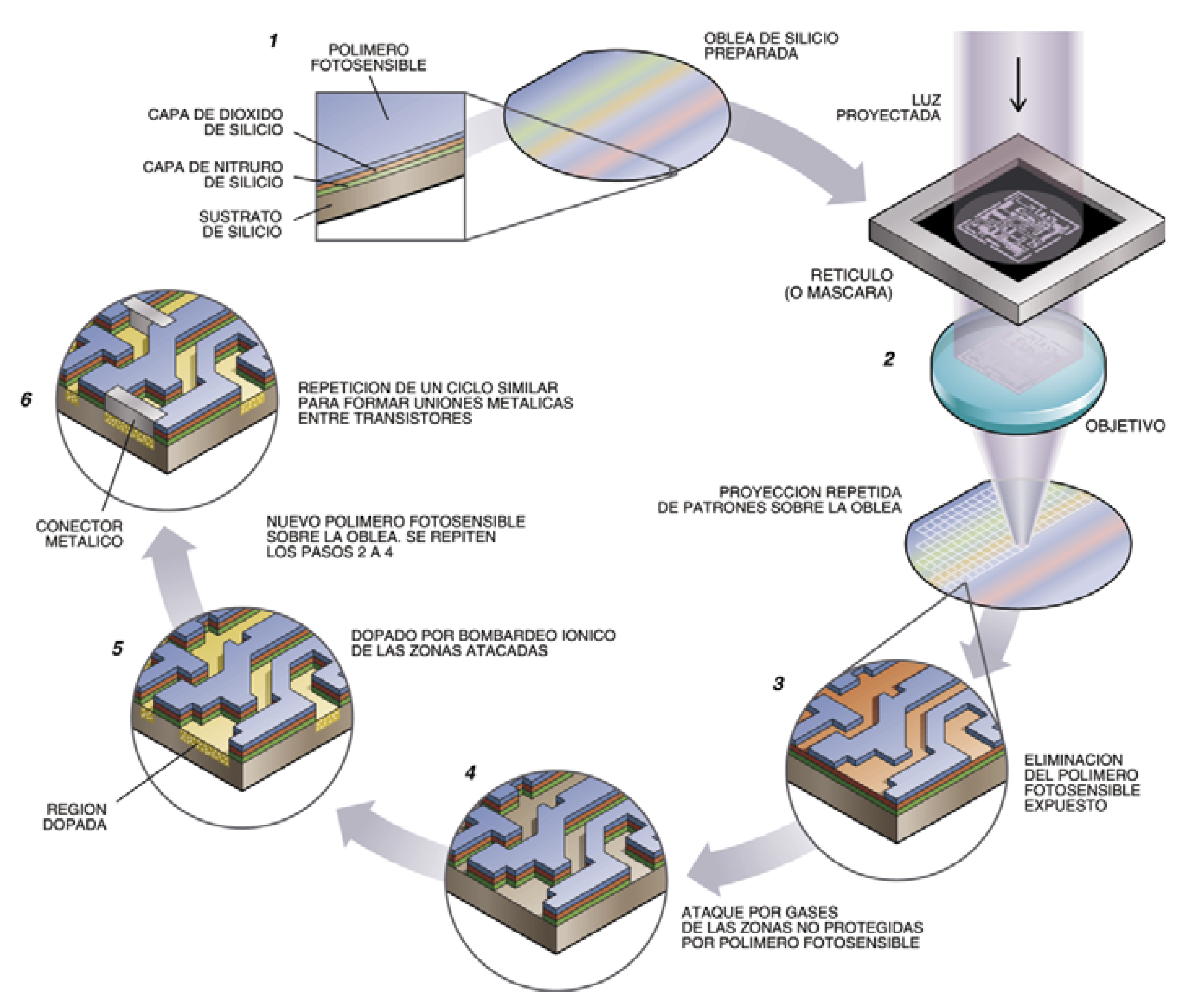
Se construye un microcircuito creando e interconectando transistores sobre una lámina de silicio para formar sistemas electrónicos complejos. El proceso de fabricación consta de una serie de etapas, o capas de máscara, en las que se depositan sobre el silicio películas de diversos materiales —algunos de ellos fotosensibles— y se exponen luego a la luz. Tras la deposición y el tratamiento litográfico, se procesan dichas capas para “grabar” los patrones que, en alineación exacta y combinados con los de las capas sucesivas, producen los transistores y sus conexiones. Suelen obtenerse 200 o más pastillas a la vez sobre un delgado disco u oblea de silicio.

En el primer juego de capas de máscara, se depositan películas aislantes de óxido para formar los transistores. A continuación se extiende sobre esas películas un revestimiento fotosensible. Mediante una máquina posicionadora por pasos, similar a una ampliadora fotográfica, se expone ese polímero fotosensible. La máquina posicionadora emplea un retículo o máscara para proyectar un patrón sobre el polímero fotosensible. Una vez expuesto, el polímero se desarrolla, y perfila así los espacios —ventanas de contacto—, donde se interconectan las diferentes capas conductoras. Un agente grabador ataca entonces la película de óxido al objeto de que puedan establecerse los contactos eléctricos con los transistores. Se elimina el polímero fotosensible.

Más juegos de capas de máscara, con etapas de deposición, litografía y ataque muy similares, crean las películas conductoras de metal o polisilicio necesarias para enlazar transistores. La fabricación de una pastilla requiere, en total, unas 19 capas.

La física subyacente bajo estos procesos de fabricación induce a imaginar posibles obstáculos que se opondrían a un progreso continuo. En primer lugar, el relacionado con el límite de resolución de Rayleigh, así llamado en honor del premio Nobel John William Strutt, tercer barón de Rayleigh. En virtud de ese límite, el tamaño de las características más pequeñas que puede distinguir un sistema óptico de abertura circular es proporcional a la longitud de onda de la fuente luminosa dividida por el diámetro de la abertura del objetivo. En otras palabras, cuanto más corta sea la longitud de onda y mayor la abertura, más fina será la resolución.

Dicho límite constituye una ley fundamental para este sector de la industria, puesto que sirve para determinar el mínimo tamaño de los transistores materializados en una pastilla. En la litografía de los circuitos integrados la fuente de luz al uso es la lámpara de mercurio. Sus rayas espectrales más útiles para estos fines se producen a los 436 y 365 nanómetros, las llamadas rayas g e i del mercurio. La primera de ellas es visible para



2. LAS PASTILLAS SE FABRICAN en ciclos de etapas repetidas hasta veinte veces. De una oblea de silicio con recubrimiento fotosensible se obtienen muchas pastillas a la vez (*1*). En cada ciclo se proyecta repetidamente un patrón distinto en la oblea (*2*), formándose una pastilla en cada posición de la imagen. El recubrimiento fotosensible se elimina (*3*); se atacan con gases las zonas expuestas a la luz (*4*). Dichas zonas se bombardean con iones ("dopado"), creando transistores (*5*). Estos se conectan luego al añadir capas de metal y de aislante en sucesivos ciclos (*6*).

el ojo humano, y la última apenas sobrepasa la visibilidad en el ultravioleta. Las aberturas numéricas varían desde un extremo bajo cercano a 0,28 micrometros para lentes industriales corrientes hasta un valor de unos 0,65 para las de herramientas litográficas de punta. Considerando estos valores junto con otros aspectos derivados de las demandas de la fabricación en masa, se obtiene una resolución límite en torno a 0,54 micrometros para lentes de raya g y de 0,48 para las de raya i.

Hasta mediados de los ochenta se aceptó como límite práctico el funcionamiento en la raya g. Pero uno tras otro se fueron allanando los obstáculos que impedían el funcionamiento en la raya i; ocurrió de una manera que ilustra las complejas relaciones entre economía y técnica en la industria. Las barreras de orden técnico se salvaron, y aparecieron otras que no eran sino simples consecuencias del nivel de riesgo tolerado por la empresa. Esta historia tiene mucho que ver con la actual situación de la industria, próxima a los límites prácticos del funcionamiento en raya i.

Una de las dificultades para el funcionamiento en la raya i estribaba en que casi todos los vidrios de las lentes son opacos a esas frecuencias, lo que obligaba a utilizar el cuarzo. Aunque las lentes de cuarzo eran realizables, se aducía que sería difícil comprobar la alineación de configuraciones que no son visibles. Además, solamente un 70 % de la radiación en raya i atraviesa el cuarzo; el resto se convierte en calor en la lente, con la posible distorsión consiguiente de la imagen.

Tampoco acababan ahí los problemas. El límite de Rayleigh fija también el intervalo dentro del cual se mantiene enfocado el patrón proyectado por la lente. La restricción de la profundidad de enfoque va en contra de los límites de resolución; a mejor resolución, menor profundidad de enfoque. Para una lente como la descrita, la profundidad de enfoque

es de unos 0,52 micrometros en las mejores lentes de raya g y de 0,50 en las de raya i. Profundidades tan exiguas exigen que la superficie de la oblea sea extremadamente plana, mucho más de lo que hace pocos años podía conseguirse a lo largo de la diagonal de una pastilla grande con el mejor equipo disponible.

Para superar tales inconvenientes, se idearon soluciones nuevas; por ejemplo, métodos de aplanamiento que aseguraban superficies ópticamente planas. Mediante ajustes finos en los bordes de los patrones en el retículo se pudo desplazar de fase la radiación de raya i entrante. Ello permitía definiciones más nítidas de los bordes y, por tanto, dimensiones menores, con lo que se obviaba así el límite de Rayleigh. Uno de los últimos ajustes consistió en aceptar un valor más bajo de la constante de proporcionalidad, que guarda relación con el grado de contraste de la imagen proyectada en la oblea durante la litografía. Para el funcionamiento en raya i los fabricantes se armaron de coraje y aceptaron una constante de proporcionalidad inferior a la que hasta entonces se había considerado práctica. Esto implicaba unos márgenes más reducidos durante la fabricación, y exigía controles más rígidos sobre los procesos de litografía, deposición y ataque para mantener alto el número de pastillas aceptables por oblea (el rendimiento). Gracias a tales innovaciones, se exponen ahora de forma rutinaria en raya i dimensiones de 0,35 micrometros.

En este último ejemplo, lo que realmente se discutía era la pérdida de contraste que el fabricante estaba dispuesto a tolerar. Con un contraste perfecto, la imagen creada en el polímero fotosensible es nítida. Lo mismo que tantas otras limitaciones en la industria, la relación de contraste se presentaba como barrera técnica cuando en realidad entrañaba una decisión arriesgada. Se comprobó que con una menor relación de contraste no se rebajaban los rendimientos, si en otras partes del proceso se aplicaban controles más estrictos.

Es difícil predecir cuándo se agotará, si es que ello ocurre, esta vena de creativas mejoras. No obstante, antes de topar con auténticas barreras técnicas se dejará sentir la repercusión económica de esa aproximación a las mismas. Sabido es que los costes implicados en la consecución de niveles más elevados de prestaciones de la pastilla crecen con gran rapidez conforme nos acercamos a los límites de determinada técnica de fabricación, sobrepasados luego. Los costes en aumento podrían arrastrar los precios hasta más allá de lo que los compradores estarían dispuestos a tolerar, provocando el estancamiento del mercado antes de tropezar con las barreras técnicas.

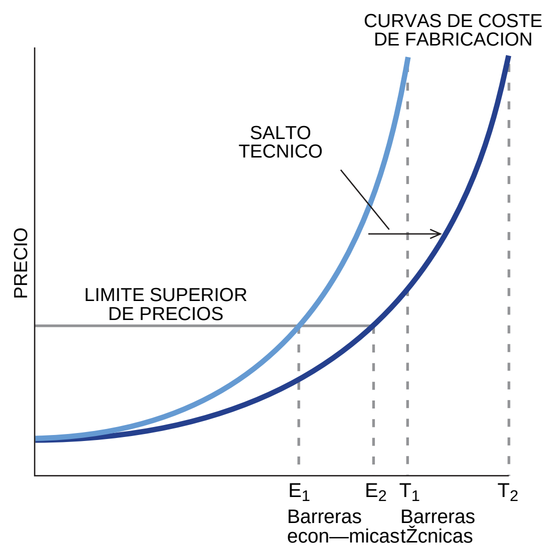
Pero cuando por fin se asienta una nueva técnica de fabricación, los costes de las pastillas comienzan a descender. En ese momento la industria ha pasado de una curva coste-prestaciones asociada a la técnica antigua a otra curva propia del nuevo proceso. En efecto, el salto de una técnica a otra hace que la curva de costes descienda, y aleja más los límites técnicos. Cuando tal cosa sucede se pueden conseguir niveles de prestaciones más altos sin elevar los costes, lo cual mueve a los compradores a sustituir sus viejos equipos. Lo sabe muy bien la industria electrónica, donde los productos suelen quedarse anticuados antes de su total desgaste.

Los principios hasta aquí expuestos se aplican a toda clase de pastillas, pero las de memoria son las que cubren un mayor volumen de negocio y, por varios conceptos, las más representativas. En 25 años el precio de un megabyte de memoria de semiconductores ha descendido desde 70 millones a menos de 5000 pesetas. Pero en el mismo período el costo de construir una fábrica para producir estas pastillas de memoria se ha elevado desde menos de 500 millones hasta los 150.000 millones de pesetas, con lo que sólo unas pocas firmas muy importantes pueden abordar esta actividad. La imparable ascensión de estos costes, sobre todo disparada por los gastos de superar barreras técnicas cada vez más formidables, obliga de nuevo a centrar la atención en los límites de la industria de los semiconductores.

No es probable que esta industria sufra un parón a corto plazo. Pero nos acercamos a barreras tan elevadas que el superarlas probablemente exigirá cambios mucho más drásticos que en ocasiones anteriores. Un breve análisis de los obstáculos permitirá comprender las razones.

En su mayor parte, provienen de las estructuras de película delgada que componen el circuito integrado o de las fuentes de luz necesarias para formar las finísimas pistas conductoras, o de la propia anchura de dichas pistas. En ciertos casos se relacionan con la constante dieléctrica de la película aislante. La constante dieléctrica nos indica la capacidad que posee una película aislante de evitar corrientes de fuga entre las pistas conductoras, sumamente próximas, de la pastilla. Cuantos más transistores se integren en la pastilla, más densamente agrupadas estarán las películas, y con ello aumentará la diafonía entre las pistas que conducen señales.

Para evitarlo podría reducirse el valor de la constante dieléctrica, lo que hará más impermeable a la diafonía el aislante. Pero esto, a su vez, origina una doble búsqueda: por un lado, de materiales nuevos de más baja constante dieléctrica y, por otro lado, de nuevas estructuras peliculares capaces de reducir todavía más la constante dieléctrica total. Se está investigando la posibilidad de sembrar la película aislante con diminutos huecos para



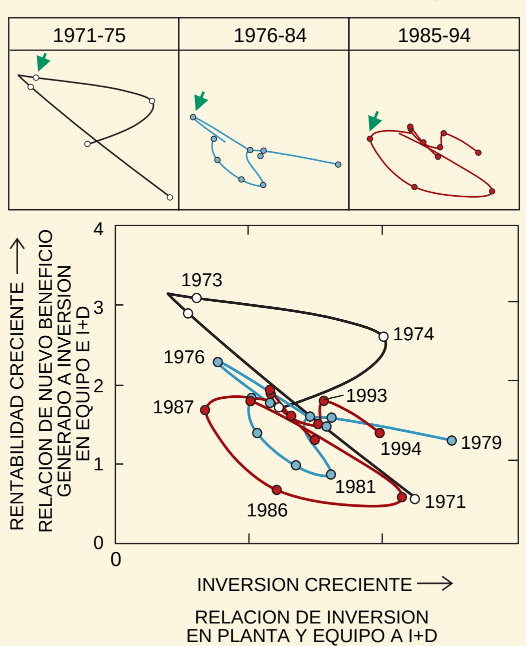
3. LA CURVA DE COSTES caracteriza un sistema de fabricación de pastillas. En las barreras técnicas T_1 y T_2 una pequeñísima mejora de prestaciones requiere un enorme aumento de costo. Pero mucho antes se tropieza con las barreras económicas, E_1 y E_2, en la intersección de las curvas con la línea que representa los precios máximos tolerados por los usuarios. Los saltos técnicos hacen descender la curva a la posición de color más oscuro. Entonces mejoran las prestaciones, y las barreras pasan a ser E_2 y T_2.

¿Cuánto rinde el dinero?

Durante sesenta años la mayoría de las empresas se sirvieron del mismo modelo para registrar los rendimientos financieros de sus inversiones en equipos, investigación, gestión de mercados y todos los demás conceptos. Desarrollado por Donaldson Brown de Du Pont en el umbral de la primera guerra mundial, la primera empresa en aplicarlo fue General Motors en su esfuerzo por sobrepasar a Ford Motor Company como líder del mercado de automóviles.

Desde su adopción universal, el modelo en cuestión, llamado de rendimiento de la inversión, o ROI (*return on investment*), ha mantenido su validez en industrias con índices de crecimiento y de avance técnico relativamente pequeños. Los autores no tienen noticia de que el modelo se haya comportado bien en el sector de los semiconductores, en el que hay numerosos índices de variación —prestaciones del producto y coste del equipo de fabricación, entre muchos— que en absoluto son lineales. Desde un punto de vista económico, el carácter no lineal distingue a la industria de los semiconductores de cualquiera otra gran industria; no sólo eso: también hace inadecuados todos los demás modelos.

Las inversiones en equipos e investigación que periódicamente necesita este sector son bastante grandes y crecen exponencialmente. Además, como en toda empresa, las inversiones en estos conceptos y otros análogos deben generar un beneficio saneado. Pero hoy día las firmas de semiconductores carecen de medios para determinar con precisión qué parte de su rendimiento financiero procede de sus inversiones en equipo, y ello les plantea un grave problema. Desde hace años, venimos trabajando en métodos descriptivos del sector que tengan en cuenta los elementos no lineales, con miras a modificar el modelo ROI.



LA CARTA DE FASE muestra la relación entre beneficios e inversiones en nuevas técnicas, a lo largo de distintas épocas de Intel. Uniendo los puntos señalados se trazan bucles que representan ciclos de alrededor de seis años (en diferentes colores). En cada ciclo se pasa de un período de escasa rentabilidad con fuertes inversiones a otro de muy buenos rendimientos en efectivo a partir de inversiones mucho menores. Las flechas verdes señalan el año de cada ciclo en que Intel obtuvo mayores ganancias y gastó menos en equipo.

En el modelo clásico, se acude a las inversiones de capital adicionales cuando la capacidad real de un fabricante no alcanza la capacidad prevista (entendida ésta como la capacidad que la empresa cree necesaria para satisfacer la demanda en un futuro inmediato). Estas diferencias suelen deberse al envejecimiento del equipo y a la pérdida de personal experto. En el sector de los semiconductores, no sólo hay que anticiparse constantemente a los aumentos de capacidad, sino que también se deben prever y planificar los grandes avances en la propia técnica de fabricación.

Para dar cuenta de este efecto de frenado técnico, empezamos por considerar la relación del efectivo generado en cualquier año determinado a las inversiones en nuevas técnicas del año anterior. En este contexto, por nuevas técnicas entendemos los nuevos equipos de fabricación y la investigación y desarrollo. El efectivo generado durante el año es el beneficio bruto resultado de las operaciones, incluyendo el dinero destinado a la reinversión en investigación y desarrollo.

Esta relación nos indica el incremento de beneficios por incremento de inversión, a un año de desfase. Constituye un exponente real del grado de rentabilidad que alcanza una compañía gracias a sus inversiones en técnicas cada vez más costosas. El ROI, por el contrario, mide los beneficios incrementales durante el año procedentes de todas las inversiones, no solamente de las del año anterior.

Hasta aquí no hemos hecho más que incluir en las nuevas técnicas el equipo de fabricación incorporado y la investigación y desarrollo. Pero el efecto del frenado técnico se hace más acentuado cuando se separan estas dos categorías y se dilucidan los flujos y reflujos entre ellas. Una manera de conseguirlo es calcular año tras año la razón entre estas dos inversiones y después representarla en función de la relación antes mencionada entre efectivo generado en el año y las inversiones en nuevas técnicas del año anterior, como ilustra el adjunto diagrama o carta de fase para la compañía Intel.

Conectando los puntos marcados en el diagrama se trazan bucles correspondientes a ciclos de unos seis años. En cada uno de ellos, Intel pasa desde un período de operaciones no rentables causadas por fuertes inversiones de capital hasta otro período en el que se consiguen grandes beneficios derivados de inversiones de capital mucho más ligeras. En el gráfico se ve que Intel entra ahora en otro período de fuerte inversión de capital. Otras empresas de semiconductores (y asimiladas) recorren ciclos parecidos, si bien varían de una a otra los períodos de rentabilidad y de fuertes inversiones.

La parte inferior de cada bucle es más baja que la del bucle precedente. Esto quizá sea la información más interesante que ofrece la ilustración: significa que los beneficios de Intel, con relación a los gastos que los han generado, descienden en cada ciclo sucesivo. Al mostrar el ciclo completo entre las inversiones en técnica y su rentabilidad, la carta de fase es un poderoso instrumento para observar y gestionar los ciclos de inversión peculiares de esta singular y dinámica industria.

—G. D. H. y J. D. H

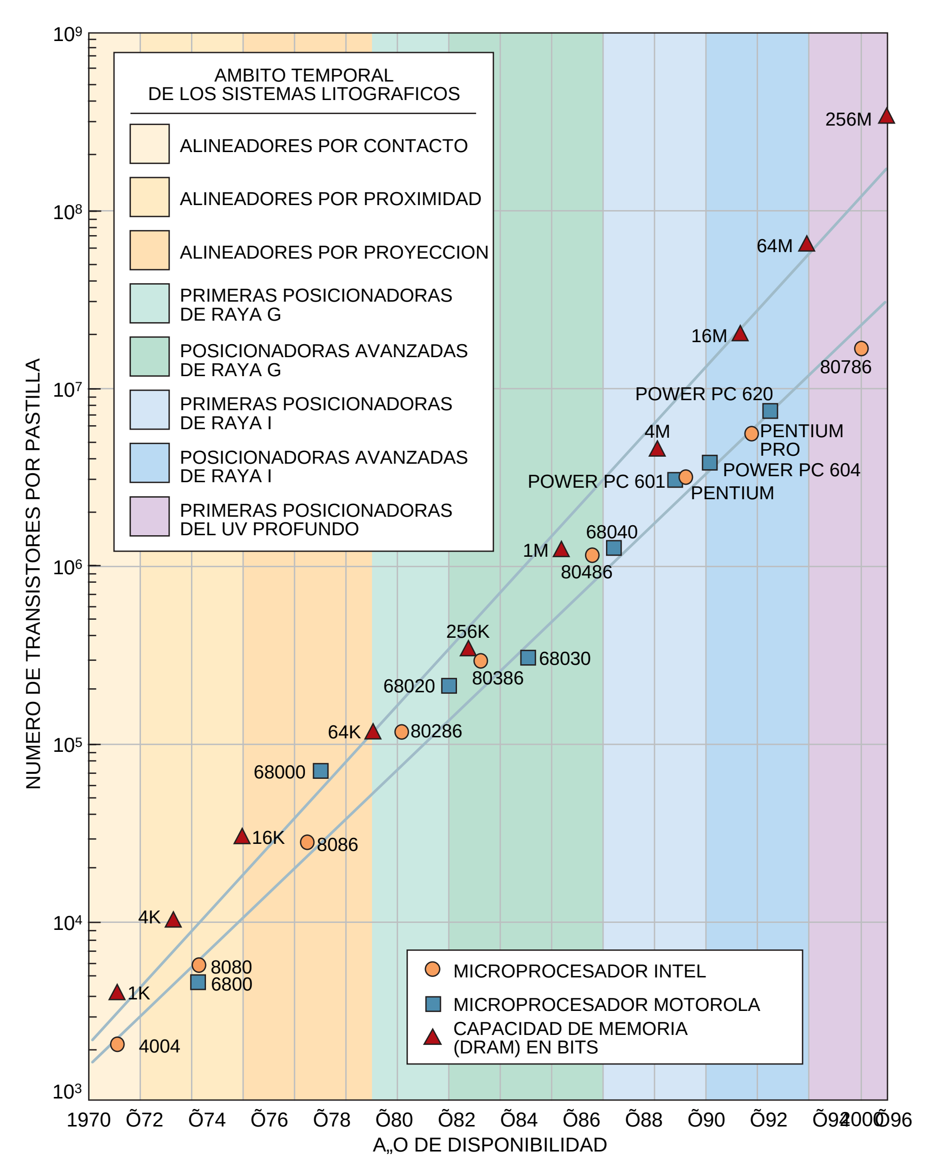
aprovechar la bajísima constante dieléctrica del aire o del vacío.

En otros lugares de la pastilla se necesitan materiales con la propiedad opuesta: una elevada constante dieléctrica. La mayoría de los circuitos integrados requieren condensadores. En una memoria dinámica de acceso aleatorio (DRAM) cada bit se almacena en un condensador, dispositivo capaz de retener la carga eléctrica. (Un condensador cargado representa el 1 binario; uno descargado, el 0.) Por lo común, la capacitancia disponible en la pastilla se queda corta. La capacitancia es proporcional a la constante dieléctrica; por consiguiente, las DRAM y otras pastillas similares requieren materiales con una constante dieléctrica elevada.

La búsqueda de fuentes de luz más avanzadas para litografía es asimismo impresionante. La mayor finura de resolución exige longitudes de onda más cortas. Pero la luz de mercurio al uso emite muy poca energía en longitudes de onda inferiores a los 365 nanómetros de raya i. Los láseres excímeros descienden hasta unos 193 nanómetros, pero por debajo de esa longitud de onda generan muy poca energía. En los últimos años, se ha aplicado la litografía por láser excímero para fabricar algunas pastillas de aplicación especial, de altas prestaciones, en pequeños lotes. Para longitudes de onda aún más cortas, las fuentes de rayos X constituyen el último recurso. Sin embargo, en 20 años de investigación la litografía por rayos X sólo ha producido modestos resultados, y no existen en el mercado pastillas fabricadas por tal procedimiento.

Al aparecer obstáculos técnicos crecen también las barreras económicas, usualmente manifestadas en elevaciones de coste de los equipos, sobre todo de litografía. Los avances en el equipo litográfico adquieren especial importancia ya que determinan las dimensiones mínimas que pueden materializarse en una pastilla. Aunque esta posible dimensión mínima se haya ido achicando un 14 % anual desde los primeros tiempos de la industria, el precio del equipo ha subido cada año un 28 %.

Al principio, en cada nueva generación de equipo litográfico el coste se decuplicaba. De entonces acá, el desarrollo entre una generación y otra de alineadores de posición ha logrado reducir aumento tan fuerte a una simple duplicación de precios en cada nuevo avance importante. Otros tipos de equipos utilizados en fabricación de semiconductores han conocido un comportamiento similar.



4. LAS DENSIDADES DE TRANSISTORES en los circuitos integrados han crecido exponencialmente, como indica la gráfica logarítmica. Para sostener tal ritmo se han utilizado en la fabricación sucesivos sistemas litográficos que proyectan en las obleas los patrones de circuitos. La mayor regularidad y simplicidad del diseño han conseguido elevar las densidades de las pastillas de memoria.

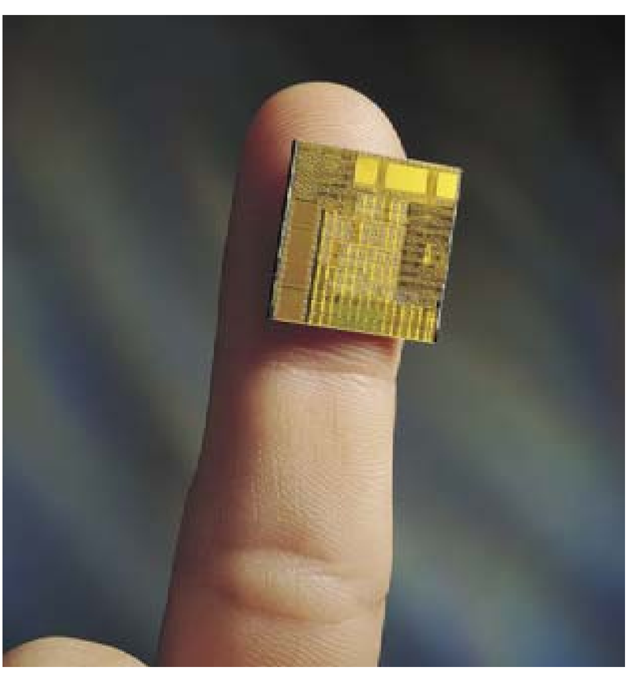
Por todo ello, los costes generales de la creación de fábricas de semiconductores han crecido a la mitad del ritmo predicho por Moore, duplicándose cada tres años. Intel se gasta el equivalente de más de 140.000 millones de pesetas en cada nueva planta que abre en EE.UU.; Samsung y Siemens construyen factorías que costarán cerca de 180.000 millones, y Motorola proyecta una planta que podría llegar a los 300.000 millones. Aunque puedan construirse fábricas más pequeñas por menos dinero, su rendimiento no sería tan alto.

Estos enormes costes de las fábricas confirman que nos aproximamos a barreras técnicas imponentes. Sin embargo, nos parece infundado el temor de que sean insalvables y fuercen a un parón de la industria. Lo que sí puede suceder es que los precios de los semiconductores aumenten y se desacelere el ritmo de cambio en este sector.

Ello además tendría algún precedente. Entre 1985 y 1988 el coste por bit de memoria creció un 279 % sin consecuencias catastróficas; antes bien, 1988 fue uno de los mejores años en la industria de semiconductores. Cuando el coste por bit inicie una subida incesante, probablemente sobrevendrá una transformación industrial que altere los modelos de empresa.

En la práctica, toda industria que perdure algunos decenios habrá pasado por tales transformaciones. Pese a su carácter singular, la industria de los semiconductores se rige también por los principios económicos de la oferta y la demanda. Podemos, pues, acudir a la historia de sectores más antiguos, como la aviación, los ferrocarriles y la automoción, para buscar episodios ilustrativos de lo que cabe esperar.

Como en los semiconductores, los comienzos de la industria aeronáutica fueron muy rápidos. En menos de cuarenta años se pasó del monoplano de los hermanos Wright al *Clipper* de Pan Am, y a las *Flying Fortress* y *Superfortress*. También el sector atendió primeramente a los mercados militares antes de dedicarse a la aviación comercial. La industria aeronáutica sostuvo su crecimiento disminuyendo los costes por pasajero y kilómetro recorrido, a la par que reducía los tiempos de vuelo. Los dos objetivos son equiparables a los tenaces esfuerzos por aumentar la densidad de transistores en una pastilla y mejorar así las prestaciones, reduciendo además los costes de la pastilla.



5. El CIRCUITO INTEGRADO, o dado, del microprocesador Power PC 620 de Motorola contiene cerca de siete millones de transistores. Se encapsula en cerámica. Se destina a estaciones de trabajo de ordenador y servidores de ficheros.

Durante decenios, la aviación progresó concentrando su investigación y desarrollo en aumentar la capacidad de pasajeros y la velocidad. Finalmente se llegó a un máximo de capacidad con el *Boeing* 747 y a un tope de velocidad con el *Concorde*. El 747 tuvo un gran éxito, pero sus numerosas plazas sólo se llenaban en las rutas más largas. El *Concorde*, por su parte, vio limitada su utilización por la contaminación acústica que creaba. Pero ambos representaron un límite, en el sentido de que la técnica no permitía en condiciones realistas obtener velocidades y capacidades mayores. Pese a ello, la aviación no cayó en barrena, sino que entró en una segunda fase en la cual se diseñaron aviones más pequeños y diversos, construidos para mercados específicos. El foco de la investigación y desarrollo ya no se centraba en la velocidad y la capacidad, sino en un funcionamiento eficaz y silencioso y en la comodidad del pasajero.

Hubo en los ferrocarriles tendencias similares. Desde el siglo pasado hasta bien entrados los setenta, la potencia de tracción de las locomotoras fue aumentando continuamente con el fin de reducir los costes del transporte de mercancías. La inversión de capital en las locomotoras era cuantiosa, pero la potencia de tracción crecía más deprisa que los costes. Sin embargo, se llegó a un punto en que los altos costes de desarrollo forzaron a la unión de fabricantes y usuarios. La Union Pacific Railroad, el mayor ferrocarril de su época, se asoció con la División de Electromoción de General Motors para crear el EMD DD-40, un monstruo que resultó ser demasiado grande e inflexible para todo lo que no fuese transportar grandes cargas a través de los Estados Unidos. Tras su fracaso, la industria ferroviaria volvió a emplear máquinas más pequeñas que trabajasen por separado con cargas pequeñas y fueran capaces de acoplarse para el transporte de otras mayores.

La situación actual de la industria de semiconductores no difiere mucho de la reseñada a propósito de las empresas ferroviarias antes del EMD DD-40. Cuesta tanto el desarrollo de nuevas factorías para las futuras generaciones de pastillas de memoria que las empresas han empezado a aliarse en diferentes grupos, cada uno de los cuales atacará a su manera el tremendo problema de la fabricación económica de pastillas de altísima densidad.

De la fabricación de automóviles pueden también extraerse lecciones. En los años veinte, Henry Ford fue construyendo factorías cada vez más eficientes, hasta culminar en la planta gigantesca de Rouge, donde empezó a fabricarse el modelo A en 1928. Partíase allí del propio mineral de hierro para producir casi todas las piezas del coche. Pero el sector automovilístico había ya cambiado, y el esfuerzo de Ford por reducir los costos de fabricación mediante la construcción de factorías mayores y de mejor rendimiento hubo que pagarlo sacrificando la diversidad de productos. Como decía el chiste, podía comprarse un coche Ford del color que se quisiera, siempre que fuera negro.

Las tendencias en la fabricación de automóviles se orientaron a ofrecer más facilidades, prestaciones y modelos. Alfred E. Sloan, de General Motors, reconoció que el rendimiento ya no aumentaba con el tamaño de la fábrica y que las grandes plantas eran buenas para producir grandes series del mismo producto. Por tanto, disgregó la empresa en divisiones con mercados claramente definidos y fábricas especializadas que les dieran soporte. Los clientes prefirieron la mayor variedad de diseños que de ahí resultara. General Motors empezó muy pronto a ganar mercado a costa de Ford.

El desarrollo de los microcircuitos sigue pasos semejantes. Intel diversificó en más de 30 variedades su oferta del microprocesador 486, mientras que a principios de los ochenta sólo ofrecía tres versiones de su microprocesador 8086 y nada más que dos del 8088. Las pastillas de memoria dinámica siguen esa pauta diversificadora. Toshiba, por ejemplo, posee actualmente 15 veces más configuraciones DRAM de cuatro megabit que las de 64 kilobit que tenía en 1984.

En su fase inicial todas las industrias señaladas, desde las ferroviarias a las de semiconductores, se han esforzado por mejorar prestaciones y reducir costos. Las tres industrias del transporte, considerablemente más maduras, han pasado a una segunda fase en la que se persigue el refinamiento y la diversidad de productos,

de modo similar a lo que empieza a verse en la fabricación de microcircuitos. Las empresas aplican ahora la técnica a potenciar las líneas de productos más que a reducir los costes de fabricación. Hay que destacar que estas industrias han prosperado pese a la subida de los costes.

Puede no faltar mucho para que la industria de los semiconductores toque techo. El ritmo de la integración de transistores declinará y los costes de fabricación empezarán a dispararse. Pero como sugiere la experiencia de la aviación, el ferrocarril y el automóvil, los semiconductores pueden prosperar aunque encuentren nuevas barreras económicas y técnicas, en gran medida infranqueables. En una industria más madura, el desarrollo provendrá de productos refinados con una diversificación mayor.

El almacenamiento de la información, y las funciones sociales que de él dependen, continuarán su avance. En realidad, moderar el ritmo del progreso en los semiconductores podría acarrear inesperadas ventajas, como la de dar tiempo a los programas y arquitecturas informáticas para que asimilen los grandes saltos en prestaciones de los microcircuitos. También en la industria de los semiconductores la veteranía puede ser un grado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING EQUIPMENT STILL AFFORDABLE? Jerry D. Hutcheson y D. Dan Hutcheson en *Proceedings of the 1993 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, septiembre de 1993.

SIA 1994 NATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS. Semiconductor Industry Association, 1994.

LITOGRAPHY AND THE FUTURE OF MOORE'S LAW. Gordon E. Moore en *SPIE Proceedings on Electron-Beam, X-Ray, EUV, and Ion Beam Lithographies for Manufacturing*, vol. 2437; febrero de 1995.

HACIA EL "CERO COMA UNO". Gary Stix en *Investigación y Ciencia*, n.º 223, págs. 70-75, abril de 1995.

AFFORDABILITY CONCERNS IN ADVANCED SEMICONDUCTOR MANUFACTURING: THE NATURE OF INDUSTRIAL LINKAGE. Donald A. Hicks y Steven Brown en *Proceedings of the 1995 International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, septiembre de 1995.

Perfiles

Susan Landau

JOSEPH ROTBLAT: *De la fisión nuclear al Nobel de la Paz*

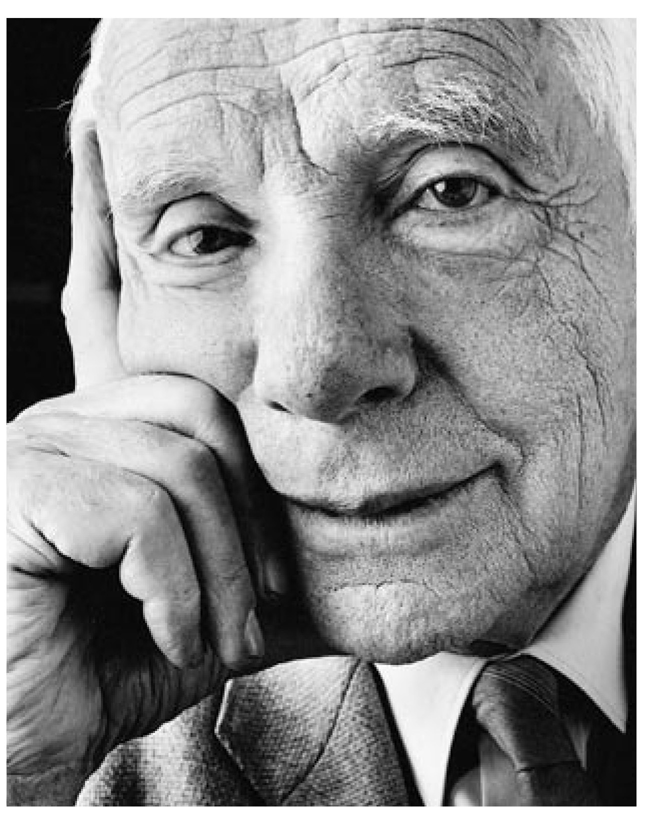
La construcción de la bomba atómica es el tema de nuestro tiempo. Y de esa experiencia muchos científicos han relatado sus memorias, entretejidas en la maraña de la política doméstica o yuxtapuestas con la búsqueda de los fundamentos del universo. Hubo un físico, sin embargo, que marchó por un sendero diferente, que abandonó el proyecto Manhattan cuando se descubrió que los alemanes no estaban construyendo la bomba.

"El que lo dejó fue Joseph Rotblat —escribió Freeman Dyson— quien, con una honradez memorable, renunció a su puesto en Los Alamos." Joseph Rotblat salió del Laboratorio Nacional de Los Alamos en 1944, cuando el curso de la historia aún podía modificarse. Siendo físico nuclear, se pasó a la física médica y se hizo ferviente defensor del desarme. El año pasado se le concedió el premio Nobel de la Paz por sus esfuerzos en pro de la eliminación de las armas nucleares.

Rotblat explicó hace varios años cómo tomó su decisión en cierta reunión de los Médicos por la Responsabilidad Social, celebrada en Chicago: "Se trataba de una elección entre el fuego y la sartén. La misma idea de trabajar en un arma de destrucción masiva le resulta aborrecible a cualquier científico; va contra los ideales básicos de la ciencia. Por otro lado, estos mismos ideales estaban en peligro de ser liquidados si —por eludir la construcción de la bomba— un régimen más vil pudiera llegar a dominar el mundo. No conozco otro caso en la historia en el que los científicos se hayan enfrentado a un dilema tan angustioso.

"Cuatro años después de que yo comenzara a trabajar en la bomba, cruzaron por mi mente serias dudas sobre este trabajo. Era para mí tan claro como la luz del día que Alemania, con sus vastas operaciones militares y una industria inutilizada, estaba muy lejos de poder construir la bomba, aun cuando sus expertos dieran con la fórmula de su fabricación. Las razones por las cuales sacrifiqué mis principios se estaban desvaneciendo rápidamente. Eso me llevó a renunciar al proyecto."

Reacio a hablar de sí mismo, tuvo la gentileza excepcional de contarme su vida. Rotblat nació en Varsovia en 1908 en el seno de una familia judía. Su padre estaba en el negocio del transporte de papel. Tenía un pony, y pasaba los veranos en una casa de campo. La primera guerra mundial acabó con ese mundo idílico. El negocio familiar se vino abajo. "En el sótano de la casa donde vivíamos, destilábamos *somogonka* (vodka ilegal) para poder sobrevivir", recuerda. "Había que luchar por la supervivencia." Se licenció en física en 1932 y comenzó a investigar en el Laboratorio de Radiología de Varsovia.



JOSEPH ROTBLAT se retiró del proyecto Manhattan en 1944

Trabajando en Polonia en los años treinta, sin las comodidades de sus colegas occidentales, Rotblat se planteó las cuestiones correctas y encontró algunas respuestas. Durante esa época, se casó con Tola Gryn, una estudiante de literatura polaca. En 1939 aceptó una invitación de James Chadwick para ir a trabajar a la Universidad de Liverpool. El ciclotrón de Liverpool formaba parte del atractivo; Rotblat esperaba construir uno en Varsovia a su vuelta. Justo cuando estaba planeando su viaje a Inglaterra, la física nuclear se vio inmersa en un torbellino. Dos químicos alemanes, Otto Hahn y Fritz Strassman, dividieron el átomo de uranio bombardeándolo con neutrones; resultó el proceso de fisión nuclear. Con el experimento no se había transformado plomo en oro, pero las consecuencias tenían la misma trascendencia. Una gran cantidad de energía se desprendía durante la fisión. Al igual que algunos neutrones.

Era crucial saber cuántos. Si fuera uno solo, la probabilidad de que el nuevo neutrón chocara a su vez con otro núcleo de uranio y continuara así el proceso sería muy pequeña. Pero si como resultado de la división se produjeran dos o más neutrones, la probabilidad de una reacción en cadena se incrementaría. Físicos de todo el mundo, él incluido, empezaron a indagar. Rotblat pronto descubrió que se liberaban varios neutrones adicionales de la fisión de cada átomo de uranio, pero en la publicación le ganó la mano el francés Frédéric Joliot-Curie.

"Empecé a pensar sobre las consecuencias y la posibilidad de que una reacción en cadena pudiera proceder a una tasa muy elevada. En ese caso, por supuesto, podría producirse

una explosión debido a la enorme cantidad de energía liberada en un intervalo de tiempo corto.” Rotblat viajó solo a Inglaterra; la beca no daba para dos. Seis meses después recibió una suma adicional, y a finales de agosto de 1939 viajó a Polonia a preparar las cosas de modo que su esposa pudiese reunirse con él en Liverpool.

El salió de Polonia primero; Tola debía reunírsele en breve. Como había una censura parcial de prensa en Polonia, ni Rotblat ni su esposa se dieron cuenta de lo grave que se había vuelto la situación. Los nazis invadieron Polonia el día uno de septiembre. Intentó obtener visados para su mujer a través de Bélgica, Dinamarca e Italia; en cada ocasión, las fronteras se cerraron antes de que su mujer pudiera abandonar Polonia. Rotblat no la volvió a ver nunca más.

Con la ayuda de Chadwick, comenzó a experimentar en Liverpool para sopesar las posibilidades de una bomba atómica. Las condiciones no eran lo que se dice fáciles. “Casi cada noche, yo hacía varias horas de guardia para vigilar los fuegos provocados por las bombas incendiarias.” A pesar de todo, hacia 1941 los investigadores británicos habían establecido que la bomba atómica era teóricamente posible.

Aunque los investigadores norteamericanos habían realizado grandes progresos hacia una reacción nuclear autosostenida (un reactor) se atascaron cuando intentaron elaborar un ingenio explosivo. Los británicos devolvieron a los americanos la confianza en la bomba. Churchill y Roosevelt acordaron poner en marcha un centro conjunto de investigación en los Estados Unidos. El equipo británico, en el que estaba integrado Rotblat, trabajaría con los americanos. Rotblat recuerda que una noche, en la cena, el general Leslie Groves, la autoridad militar del proyecto Manhattan, “mencionó que la construcción de la bomba atómica tenía como finalidad real doblegar a los soviéticos”. Rotblat empezó a hablar con otros físicos de Los Alamos para que no se usara la bomba, pero la respuesta habitual era que “hemos empezado un experimento; debemos ver en qué acaba”.

Los acontecimientos en Europa se sucedían con rapidez. “A finales de 1944 Chadwick me dijo que un informe de Inteligencia indicaba que los alemanes no estaban trabajando en la bomba. Pocos días después le dije que quería marcharme.” Amenazándole con la detención si hablaba de ello, los agentes de seguridad de Los Alamos impidieron que Rotblat comentara su decisión con otros científicos. Como excusa, dijo que se volvía a Europa para estar más cerca de su familia (aunque no había recibido noticias suyas durante la guerra).

Rotblat regresó a Liverpool a comienzos de 1945. Mantuvo silencio hasta el lanzamiento de las dos bombas sobre Japón el mes de agosto siguiente. Se dio cuenta de que la bomba atómica “era el pequeño comienzo de algo mucho mayor. Yo ya veía venir la bomba de hidrógeno”. Empezó a dar conferencias por toda Inglaterra, intentando convencer a sus colegas físicos de que solicitaran una moratoria en la investigación nuclear.

Rotblat cree que los científicos no deben abdicar de la responsabilidad moral de sus descubrimientos

Rotblat comenzó también una transición hacia las aplicaciones médicas de la física, y al cabo de unos años se trasladó al Hospital londinense de Saint Bartolomew. Sus estudios sobre los tratamientos del cáncer le llevaron a investigar los efectos de la radiación en colaboración con Patricia Lindop. “Todavía en 1957, doce años después de la bomba, mucha gente no creía que la radiación produjera cáncer.”

En 1954 Rotblat se entrevistó con Bertrand Rusell. El filósofo británico sugirió que convocara a un grupo de científicos con el fin de estudiar el desarme nuclear. Y así nació Pugwash, el movimiento de científicos con el que Rotblat comparte el Nobel de la Paz. Pugwash es el nombre de la ciudad de Nueva Escocia donde tuvo lugar la primera reunión. “Fue muy reducida, sólo 22 personas.” Pero, ¡qué 22 personas! Entre los participantes figuraban tres premios Nobel, el vicepresidente de la Academia Soviética de las Ciencias y un exdirector de la Organización Mundial de la Salud.

Fue una empresa extraordinaria, en un momento complicado. “Todos los occidentales, por el hecho de venir a una reunión así, para hablar de paz con los rusos, eran tachados de ingenuos que se dejaban engañar por los comunistas. Era arriesgado, era una apuesta. Podría haber saltado en pedazos. Pero resultó que la gente hablaba y argumentaba, y argumentaban como científicos.” El breve informe de la conferencia detallaba los riesgos de radiación de las pruebas nucleares, recomendaba el control de armamentos y establecía varios principios sobre la responsabilidad social del científico. Las reuniones de Pugwash siguieron adelante.

En 1961, un año de gran tensión entre el Este y el Oeste, una conferencia de Pugwash reunió al vicepresidente de la Academia Soviética de las Ciencias y al asesor presidencial norteamericano sobre temas científicos. Después se entrevistaron con John F. Kennedy y estudiaron una prohibición de ensayos nucleares. En 1963 se firmó el tratado de prohibición de pruebas nucleares de superficie. Otras reuniones de Pugwash allanaron el camino para las negociaciones de paz entre los Estados Unidos y Vietnam del Norte a finales de los sesenta, y lo mismo ocurrió en 1972 con el Tratado de Antimisiles Balísticos entre los Estados Unidos y la Unión Soviética. Durante muchos años, el despacho de Rotblat en el Hospital de Saint Bartolomew fue la oficina central de Pugwash.

Es fácil creer que con el final de la guerra fría y con las reducciones de los arsenales nucleares se han alcanzado los objetivos de Pugwash. Rotblat sabe de sobra que el mundo no es tan simple. La nueva situación presenta nuevas inestabilidades; Rusia es el caso más notable. Tampoco el final de la guerra fría ha apagado el deseo de Irak ni de Corea del Norte por ingresar en el club nuclear.

“No creo que una división permanente entre los que pueden tener armas nucleares y aquellos a los que no les está permitido poseerlas sea la base de la estabilidad mundial. Por tanto, la solución definitiva es la eliminación de las armas nucleares. ¿Cómo se puede impedir que una nación escamotee unas cuantas armas nucleares? Esa es una tarea para los científicos; asegurarse de que nadie hace trampas es en primer lugar un problema técnico.”

Quizá la labor principal de Pugwash, y de la humanidad entera, consista en crear “un clima de confianza y buena voluntad” entre las gentes de todo el mundo. “Debemos desarrollar en cada uno de nosotros un sentido de lealtad a la raza humana que constituya una extensión de la lealtad para con nuestra familia, nuestro pueblo, nuestra patria.”

Ciencia y sociedad

Espermatozoides

Diversidad morfológica

El gameto masculino es una célula haploide especializada en el reconocimiento específico del gameto femenino (otra célula haploide) y en la penetración de las cubiertas oocitarias. Los espermatozoides presentan una estructura celular muy compleja y específica que obedece a las distintas modalidades de fecundación.

Algunas especies vegetales terrestres pertenecientes a los briófitos (musgos y hepáticas), criptógamas vasculares y gimnospermas (cicadales y ginkgoales), que aún dependen del medio acuático para reproducirse, presentan espermatozoides que, en muchas ocasiones, son multiflagelados y con uno o varios orgánulos provistos de pigmentos, los llamados plastidios.

Por razón de su morfología distinguimos dos tipologías espermáticas básicas en los animales, los espermatozoides de tipo primitivo y los de tipo modificado.

Los animales con espermatozoides de tipo primitivo presentan fecundación externa y en medio acuático. Esta relación, que no es siempre biunívoca, se cumple en los braquiópodos, sipuncúlidos, ctenóforos, cnidarios, equinodermos, tunicados, hemicordados, poríferos y mesozoos, y en algunas especies de anélidos, artrópodos, moluscos, platelmintos, nemertinos, asquelmintos y peces. Los espermatozoides de tipo primitivo, de simetría radial, perviven de 2 a 3 horas.

La cabeza de los espermatozoides de tipo primitivo es redondeada o cónica. La porción apical o acrosoma, pequeña, suele estar formada por numerosas vesículas acrosómicas dispuestas sobre el polo superior del núcleo. La cromatina se halla poco condensada, con aspecto granular; el ADN está asociado a histonas. El cuello consta de una a cuatro mitocondrias que componen un anillo en cuyo centro se alojan los dos centriolos, proximal y distal.

A partir del centriolo distal se organiza el axonema de la cola del espermatozoide. El flagelo se mueve en un solo plano y se fija en el cuello del espermatozoide mediante un complejo de anclaje, de naturaleza proteica, que rodea al centriolo distal. El gameto obtiene la energía necesaria para mover el flagelo a partir del glucógeno organizado en gránulos distribuidos entre las mitocondrias.

En los animales que presentan fecundación interna los espermatozoides son de tipo modificado. Ocurre así en los pogonóforos, mirostómidos, ectoproctos, briozoos, forónidos, quetognatos y tetrápodos, y en algunas especies de anélidos, artrópodos, moluscos, platelmintos, nemertinos y peces. Los espermatozoides de tipo modificado, caracterizados por su simetría bilateral, perviven más de 12 horas y ofrecen un aspecto más filamentoso que el de los espermatozoides de tipo primitivo.

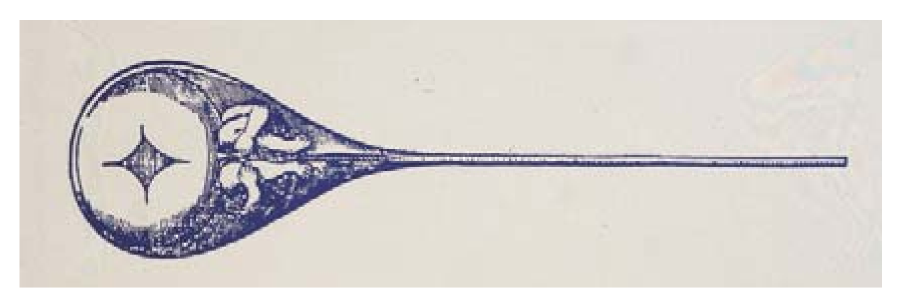
Si nos detenemos en la morfología cefálica observaremos una única vesícula acrosómica que recubre los 2/3 de la longitud del núcleo. La cromatina está muy condensada y el ADN se asocia con protaminas. En el cuello portan un solo centriolo, protegido por una estructura proteica compleja que, en sección longitudinal, tiene forma de herradura.

La cola de los espermatozoides de tipo modificado consta de tres piezas: la intermedia, la principal y la terminal. A lo largo de las mismas discurre el axonema. Pero cada pieza posee sus peculiaridades morfológicas. En la pieza intermedia, el axonema se halla rodeado por estructuras filamentosas y de naturaleza proteica que, a su vez, están rodeadas por un gran número de mitocondrias dispuestas helicoidalmente. En la pieza principal el axonema se protege mediante una estructura escleroproteica compuesta por dos ejes fibrosos unidos entre sí por elementos anulares. Por último, en la pieza terminal, muy corta, sólo encontramos la estructura axonemática.

El movimiento del flagelo del espermatozoide eyaculado procede en todas las direcciones. La energía necesaria para mover el flagelo se obtiene a partir de los fosfolípidos de las membranas mitocondriales del propio gameto y de los nutrientes aportados por las vías genitales femeninas.

Los espermatozoides de los animales, aun perteneciendo a una de estas dos grandes tipologías espermáticas, presentan peculiaridades específicas que se ajustan a los también específicos mecanismos de fecundación. Así, por ejemplo, en algunas sanguijuelas que se reproducen mediante fecundación traumática hipodérmica, los espermatozoides se inyectan en los tejidos subcutáneos de cualquier región corporal de la hembra y, desgarrando el tejido conjuntivo, deberán alcanzar los ovarios. Los espermatozoides de estas sanguijuelas se caracterizan por un aspecto extraordinariamente filamentoso y una superficie externa con relieve helicoidal que favorece la penetración del espermatozoide de una forma muy parecida al avance que experimenta un sacacorchos a través del tapón de una botella. Por su parte, el acrosoma, además de contener la vesícula acrosómica, presenta, en su región anterior, una estructura proteica, filamentosa, rígida y maciza que facilita la penetración del gameto a través del tejido conjuntivo de la hembra.

Una de las estructuras celulares de los espermatozoides que recientemente ha recibido más atención ha



Interpretación llevada a cabo por Antoni van Leewenhoek en 1675 a partir de la observación microscópica de espermatozoides humanos desecados

sido la membrana plasmática. En el plasmalema de los espermatozoides, y especialmente en la porción que limita la región cefálica, hallamos los receptores específicos para el reconocimiento de la zona pelúcida del oocito. Dicho reconocimiento induce la reacción acrosómica, es decir, la liberación de los enzimas acrosomales que llevarán a cabo la digestión de las cubiertas oocitarias.

Tras la fusión de los plasmalemas del espermatozoide y del oocito, el núcleo del espermatozoide se incorpora en el ooplasma. En este mismo instante tiene lugar la activación del oocito, es decir, la reanudación de la segunda división de la meiosis y la exocitosis de los gránulos corticales del oocito, con el fin de formar la cubierta de fecundación y evitar, así, la polispermia (o fecundación por más de un espermatozoide). Los pronúcleos masculino y femenino se acercan y, tras la disolución de las envolturas nucleares, los cromosomas se organizan y se disponen en la placa ecuatorial para formar el primer huso mitótico del cigoto.

SERGI BONET
Departamento de Biología Celular
Universidad de Gerona

Floración

¿Cuándo?

Uno de los aspectos más llamativos del desarrollo de las plantas es el proceso de la floración, que se repite con regularidad anual.

En las especies silvestres, la selección natural ha favorecido, en cada hábitat, el establecimiento de los genotipos que florecen en el momento del año que les asegura un mayor éxito reproductivo, es decir, una mayor producción de semillas. En las especies cultivadas, es el mejorador quien selecciona los genotipos más productivos en distintas condiciones ambientales, siendo frecuente que la productividad y la calidad de cada variedad de cultivo disminuya cuando se cultiva fuera del área para la que se ha seleccionado.

A pesar de la importancia que la correcta regulación de la floración tiene en la calidad y cantidad de los productos agrícolas, hasta hace unos años apenas se conocían los mecanismos moleculares que utilizan las plantas para identificar el momento idóneo de la floración; y lo mismo cabía decir de los genes que determinan cuándo, dónde y cómo se desarrollará una flor.

Para florecer en el momento más adecuado, las plantas deben reconocer la variación de los factores ambientales que cambian con regularidad a lo largo del año; por ejemplo, la longitud del día (fotoperíodo) o la temperatura. Los primeros estudios que demostraron el papel del fotoperíodo y de las temperaturas invernales como señales en la inducción de la floración de distintas especies datan de los años veinte de nuestro siglo. Esa línea de trabajo culminó en los años cuarenta con el descubrimiento de la existencia de un estímulo floral transmisible. El estímulo en cuestión se produciría en las hojas, cuando están expuestas a un fotoperíodo adecuado, y se transportaría al meristemo apical, un grupo de células que se dividen activamente en el extremo superior de la planta y del que depende todo su crecimiento vegetativo, gracias a la continua producción de hojas y ramas laterales.

En respuesta al estímulo floral, el meristemo apical promueve la formación de meristemos florales que se desarrollan en flores. Para explicar este fenómeno M. Chailakhyan postuló la existencia de una hormona floral o florígeno, y abrió un largo compás de espera de más de cinco décadas, durante el cual fisiólogos vegetales de todo el mundo se afanaron por aislar e identificar tan esquiva sustancia.

El estudio del proceso de floración cambió radicalmente a mediados de los años ochenta, cuando varios grupos de genéticos y biólogos moleculares liderados por C. Somerville, de la Universidad estatal de Michigan, y E. Meyerowitz, del Instituto de Tecnología de California, se fijaron en *Arabidopsis thaliana*. Esta mala hierba, de la familia de la col y la mostaza, ya había sido utilizada para experimentos genéticos durante los años sesenta, lo mismo en Europa que en los Estados Unidos. La facilidad con que se pueden producir y analizar mutantes en esta especie y el pequeño tamaño de su genoma permitían pensar en *Arabidopsis* como un modelo experimental idóneo para los estudios de biología vegetal, pues cabía imaginar la clonación de los *loci* identificados.

Así fue como la biología de la reproducción recibió un vigoroso impulso tras la incorporación de este sistema experimental, que ha permitido identificar y caracterizar la estructura molecular de algunos de los genes que



1. Plantas de Arabidopsis *cultivadas durante cuatro semanas en distintas condiciones de fotoperíodo. Las plantas de la izquierda, crecidas en fotoperíodos cortos (10 horas de luz), se mantienen en estado vegetativo, mientras que las plantas de la derecha, que han crecido en fotoperíodos largos (16 horas de luz), han echado flor*



2. Inflorescencias de Arabidopsis *correspondientes a un mutante de floración tardía* (izquierda), *al mutante* lfy (centro) *y al doble mutante* (derecha). *Obsérvese la formación de hojas y de estructuras florales laterales en la inflorescencia de* lfy, *que no llegan a desarrollarse en la inflorescencia del doble mutante*

determinan la identidad del meristemo floral y de los órganos florales [*véase* “Claves genéticas del desarrollo floral”, por Elliot Meyerowitz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1995].

Experimentos recientes han demostrado que dos genes, *APETALA1* (*AP1*) y *LEAFY* (*LFY*), responsables de la identidad del meristemo floral, desempeñan el papel de interruptor en el meristemo de *Arabidopsis*. Cuando ambos genes se activan en un meristemo, éste adquiere la identidad de meristemo floral y se forma la flor. Cuando ambos genes permanecen inactivos, el meristemo se mantiene en su estado vegetativo y produce ramas de crecimiento indefinido.

La investigación del control del tiempo de floración se centra ahora en la identificación de los genes que regulan la acción de estos interruptores, para así establecer en qué momento la planta florece. En general, las plantas de *Arabidopsis* acortan su tiempo de floración cuando crecen en días largos, o cuando han soportado temperaturas bajas durante el invierno. Sin embargo, una vez que las plantas han alcanzado un determinado estado de desarrollo, o si se encuentran en situaciones de estrés, florecen aunque no se dé ninguna de las circunstancias anteriores.

Recurriendo al aislamiento de mutantes de *Arabidopsis*, varios laboratorios, incluido el nuestro, han identificado una treintena larga de *loci* que podrían hallarse implicados en la regulación del tiempo de floración. Estos mutantes se agrupan en dos clases principales, según que la mutación retrase o adelante la floración; afectan, pues, a genes que se requieren para acelerar o retrasar, respectivamente, la formación de flores.

Al igual que ocurre en las especies animales, el desarrollo de las plantas atraviesa también varias etapas. En *Arabidopsis*, durante el crecimiento vegetativo que da lugar a una roseta se distinguen una etapa inicial o juvenil, en la que las hojas tienen forma redondeada y se disponen por pares de hojas opuestas, y una etapa tardía, en la que las hojas, ovaladas, dibujan una espiral. Marilyn Cruz-Alvarez y Marta Roldán, de nuestro laboratorio, han observado que las mutaciones que retrasan el tiempo de floración también alteran el desarrollo vegetativo de la planta, alargando todas las etapas de desarrollo de la roseta.

Mediante el estudio de mutantes de floración tardía sometidos a distintas condiciones ambientales, hemos llegado a identificar qué *loci* de éstos se requieren para que *Arabidopsis* florezca en días cortos o en días largos, y cuáles han de entrar en actividad para que la planta florezca tras haber quedado expuesta a temperaturas invernales. Combinando distintas mutaciones en una misma planta, hemos obtenido también información sobre la interacción entre los *loci* correspondientes, sobre *loci* que funcionan en serie, en una misma vía de control del tiempo de floración, y sobre los que actúan en paralelo, en vías cuyos efectos resultan aditivos en la aceleración del tiempo de floración. De tales trabajos se infiere que *Arabidopsis* no ha dejado en un único mecanismo de control un proceso tan importante como es la inducción de la floración, donde se pone en juego la supervivencia de su especie.

Con el fin de establecer las relaciones existentes entre los genes que controlan el tiempo de floración y los interruptores *AP1* y *LFY*, Leonor Ruiz-García y Francisco Madueño han construido plantas que poseen mutaciones en ambos tipos de genes. Por los fenotipos de tales plantas vemos que la combinación de mutaciones en *LFY* junto con mutaciones en dos de los *loci* de floración tardía impide la formación de flores o estructuras similares. Se requieren ambos *loci* en el proceso de activación de *AP1*. Por otra parte, la combinación de mutaciones en esos *loci* con mutaciones en *AP1* no causa el mismo fenotipo que la combinación con mutaciones *lfy*, sino sólo un retraso en la formación de las estructuras florales típicas

La utilidad del radar

En las fotos que acompañan a esta nota se ofrece mucho más sobre el relieve terrestre de lo que nuestros ojos pueden —literalmente hablando— llegar a percibir, pues se obtuvieron con el radar y no con ningún aparato óptico. Dentro del ambicioso programa “Misión para el Planeta Tierra” y en colaboración con los gobiernos de Italia y Alemania, la norteamericana Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio ha creado un complejo sistema de radar instalado a bordo de la lanzadera espacial que cartografía, con notable detalle, las zonas que barre. Estas imágenes, de procesamiento reciente, muestran la capacidad que el sistema posee de revelar sutiles detalles geológicos y medioambientales. Desde el suelo, tales finuras serían difíciles —si no imposibles— de detectar. El radar carece de colores propios. Se le asignan, por convención, tonalidades a las distintas longitudes de onda y grados de polarización. En este caso, los colores se eligieron para resaltar ciertos detalles y crear imágenes espectaculares y sugestivas.

El mapa radárico de la izquierda cartografía la zona de Pishan, ciudad situada en la antigua ruta de la seda en el noroeste de China, y refleja los cambios climáticos de la región. Las ramas en forma de helechos de color púrpura pálido que cruzan el centro de la imagen representan antiguos depósitos de grava, conocidos como abanicos aluviales, lixiviados de las montañas adyacentes en una época temprana de mayor pluviosidad en esa zona. Las anchas formas



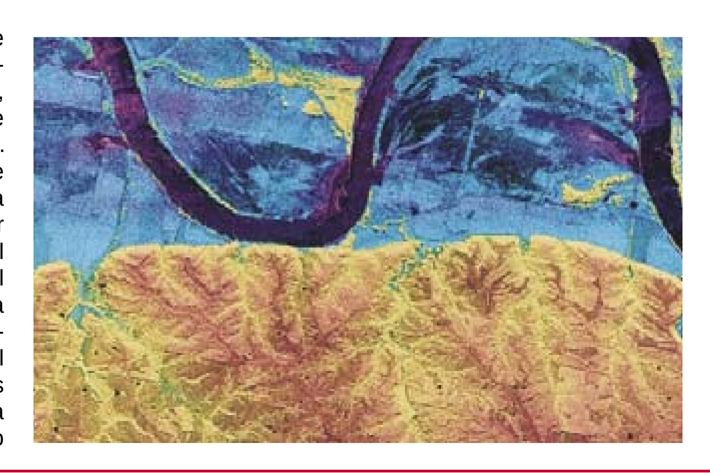


triangulares de color púrpura señalan la erosión reciente. Un proyecto de irrigación masiva contrarrestra el actual clima seco y crea oasis cubiertos de vegetación que aquí aparecen de color amarillo; la estructura reticular representa hileras de álamos que se plantaron para proteger contra el viento.

El grupo dirigido por Diane Evans, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, ha realizado la impresionante imagen del cercano valle Karakax del oeste de China, que aparece en el centro. Combinaron dos imágenes de radar para configurar la topografía tridimensional del valle. Aunque esta zona es ahora bastante estable, la falla gigante de Altyn Tagh que atraviesa de arriba abajo la escena (la diagonal que marca un cambio de pendiente y de color de la ladera del valle) da fe de intensos terremotos en el pasado. Guiado por estos mapas, un equipo internacional ha visitado China y ha recogido muestras de rocas con la esperanza de encontrar nuevos indicios sobre las inestabilidades asociadas a fallas gigantes. En esta imagen central las zonas grises representan los cauces de erosión y los depósitos de grava. La forma en la que el radar las refleja indica la edad de los cauces y permite así un conocimiento más profundo de los cambios del clima regional a lo largo de los tiempos.

Ray Arvidson y sus colaboradores, de la Universidad de Washington, han acometido la investigación, basada en observación radárica, sobre la devastación causada por una pluviosidad desmesurada. Combinaron datos de radar de la lanzadera espacial con imágenes de radar relacionadas y tomadas desde un avión DC-8 de la NASA, para evaluar los efectos ambientales de las inundaciones que asolaron el valle del Mississippi en 1993. En el mapa de la derecha los colores perfilan las alturas: el azul designa las cotas bajas y el naranja las altas. La zona azul de la mitad superior es parte de la llanura inundada por el río Mississippi. Las bandas y listas oscuras representan áreas que sufrieron una grave erosión al desaparecer las riadas. A partir de los estudios de radar estos investigadores estiman que la inundación arrojó cinco millones de toneladas de arena en la llanura anegada y se llevó tres millones de toneladas métricas de tierra. Según Arvidson este tipo de imágenes permiten valorar mejor la cuantía de los daños, estimar el potencial de futuras inundaciones y diseñar estrategias para conservar las zonas húmedas naturales que posibiliten el control de las fluctuaciones de los ríos.

COREY S. POWELL



de los mutantes *ap1*. La clonación de las secuencias correspondientes a los genes identificados mediante mutaciones que alteran el tiempo de floración permitirá conocer la naturaleza molecular de las interacciones puestas de manifiesto por el análisis genético.

La investigación genética y molecular de la regulación del tiempo de floración de *Arabidopsis* está suministrando información de interés para modificar el tiempo de floración y el ciclo de vida de otras especies. Pensemos, por ejemplo, en la importancia de acortar la fase de crecimiento vegetativo juvenil, que en muchas especies dura varios años, en la mejora de especies leñosas. Esta reducción permitiría acortar los tiempos de creación de nuevas variedades. Se acaba de demostrar, a este respecto, que la expresión constitutiva del gen *LFY* de *Arabidopsis* en plantas transgénicas de *Populus tremula* provoca que todos los meristemos de la planta florezcan en pocas semanas. Tan prometedor resultado muestra, a su vez, el grado de conservación de los mecanismos que controlan el tiempo de floración en distintas especies vegetales.

Del control del tiempo de floración pueden beneficiarse también especies herbáceas de valor agronómico. En las especies que se reproducen vegetativamente, podría inhibirse por completo la floración para asegurar la calidad de raíces, tallos, hojas o tubérculos, cuando sean estos órganos el fin de la cosecha. En otras especies hortícolas u ornamentales, el tiempo de floración podría acortarse o alargarse para ajustar el desarrollo de la especie a las condiciones ambientales de cada zona geográfica o a las necesidades del mercado. Esperanzados por estos resultados, no se nos escapa que queda todavía un largo camino por recorrer en el control del tiempo de floración.

JOSÉ M. MARTÍNEZ ZAPATER
Y JULIO SALINAS
Area de Biología Molecular y Virología Vegetal.
CIT-INIA
Madrid

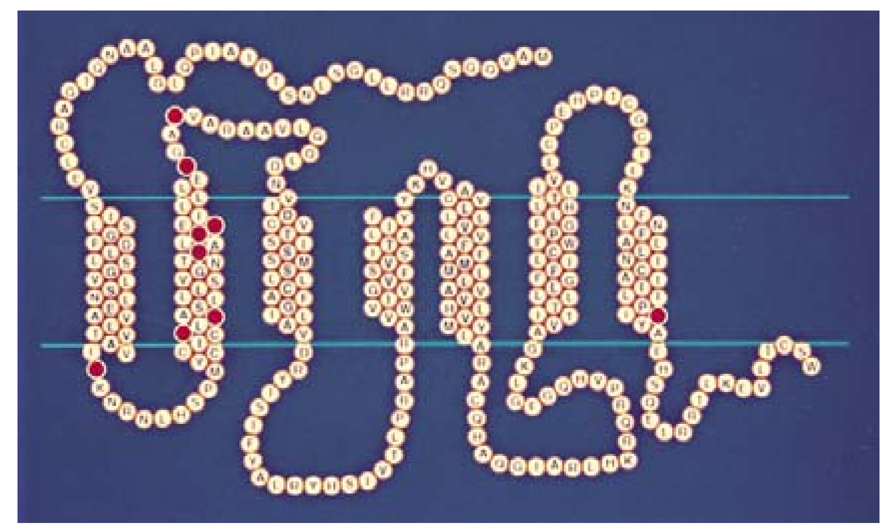
El color del pelo

Variantes génicos

Las melaninas son los pigmentos que determinan los distintos colores de la piel y del pelo en humanos y otros mamíferos.

Existen dos tipos principales de melaninas: eumelaninas, que establecen una coloración que va del marrón al negro, y feomelaninas, responsables de la gama del amarillo al rojo. De estos dos pigmentos, las eumelaninas parecen hallarse directamente implicadas en establecer el bronceado de la piel tras la exposición a la luz ultravioleta. También son las responsables, en buena medida, de la protección de la piel contra los efectos dañinos de tal radiación. Las feomelaninas, por el contrario, podrían contribuir a la gravedad de la lesión provocada por radiaciones ultravioletas en razón de su capacidad para producir radicales libres.

Tenemos, pues, que la posibilidad de adquirir un envidiable bronceado o de contraer un temible cáncer de piel, tras una exposición prolongada a la radiación ultravioleta, no sólo depende de la cantidad, sino también del tipo de melaninas que sintetizamos. De ahí el interés que reviste conocer el mecanismo que regula la producción de estos dos pigmentos en los melanocitos, las células especializadas en sintetizarlos para su posterior transferencia a la piel y al cabello.



1. Diagrama esquemático de la estructura proteica del receptor de MSH en humanos. Señalados en rojo aparecen los lugares donde los pelirrojos mostraban variaciones



2. Grupo de pelirrojos británicos e irlandeses incluidos en el estudio reseñado en el artículo. Se distinguen diversas tonalidades de pelo desde el rojo claro hasta el marrón rojizo

Aunque en el ratón y otros mamíferos hay diversos mecanismos reguladores de la síntesis de melaninas, la hormona estimulante de los melanocitos, o MSH, parece constituir el elemento principal a la hora de establecer la proporción relativa de eumelanina y feomelanina en los melanocitos. La unión de esta hormona a su receptor (MC1R), instalado en la membrana de los melanocitos, desencadena la producción preferencial de eumelanina.

Las mutaciones experimentadas en el gen que codifica el receptor MC1R afectan el patrón de síntesis de melaninas, lo que provoca cambios en el color del pelaje de varios mamíferos. La posibilidad de que la presencia de variaciones en la secuencia de este gen guardara relación con el color del pelo y de la piel en humanos constituía un campo de investigación atractivo, no sólo por su contenido científico, sino también por su potencial aplicación.

Esa línea de trabajo se abordó en el departamento de dermatología de la Universidad de Newcastle upon Tyne en Inglaterra. Se seleccionó un grupo de individuos británicos e irlandeses pertenecientes a poblaciones extremas en cuanto al color del pelo se refiere. La muestra abarcaba 30 individuos con color de pelo negro y otros 30 con cabello rojo. Se empezó por secuenciar el gen que codifica MC1R. Se observó una manifiesta ausencia de variantes en los individuos con pelo negro.

Sin embargo, el 70 % de los pelirrojos mostraron al menos una variante en su secuencia. Se identificaron un total de nueve variaciones diferentes: A64S, F76Y, D84E, V92M, T95M, V97I, A103V, L106Q y D294H. La substitución D294H, la más frecuente, apareció en el 50 % de los pelirrojos. Se abordó luego la clasificación visual de los individuos pelirrojos según sus tonalidades de pelo en rojo claro, rojo oscuro y marrón-rojizo. El estudio bioquímico indicó que la mayor frecuencia de variaciones y la presencia de más de una variante en el mismo individuo se encontraban en los grupos con tonalidades rojo claro y rojo oscuro. Tales individuos presentaban, además, altos niveles de feomelanina en su cabello, lo cual contrastaba con el bajo contenido de este pigmento en el pelo marrón-rojizo (comparable al nivel hallado en pelo marrón, rubio o negro).

Cuando se procedió a la secuenciación genética a partir de muestras

de ADN de rubios o personas de pelo marrón, sólo se identificaron tres variantes (V92M, A103V y D294H); esas variantes se presentaban en una frecuencia muy inferior a la hallada en personas con el cabello de color rojo claro o rojo oscuro. Además, ello se correspondía con personas con baja respuesta al bronceado solar.

De la investigación parece inferirse que MC1R interviene de forma destacada en la regulación de la respuesta al bronceado solar, y que las variaciones en este receptor están implicadas en determinar el color rojo del cabello en humanos. El mismo grupo de Newcastle upon Tyne está llevando a cabo investigaciones adicionales para determinar si MC1R podría servir en el futuro de marcador en el estudio genético de poblaciones y para esclarecer las amplias variaciones en pigmentación y la susceptibilidad para sufrir cánceres de piel en humanos.

PALOMA VALVERDE
Departamento de Dermatología
Universidad de Newcastle upon Tyne
Reino Unido

Atrofia muscular espinal

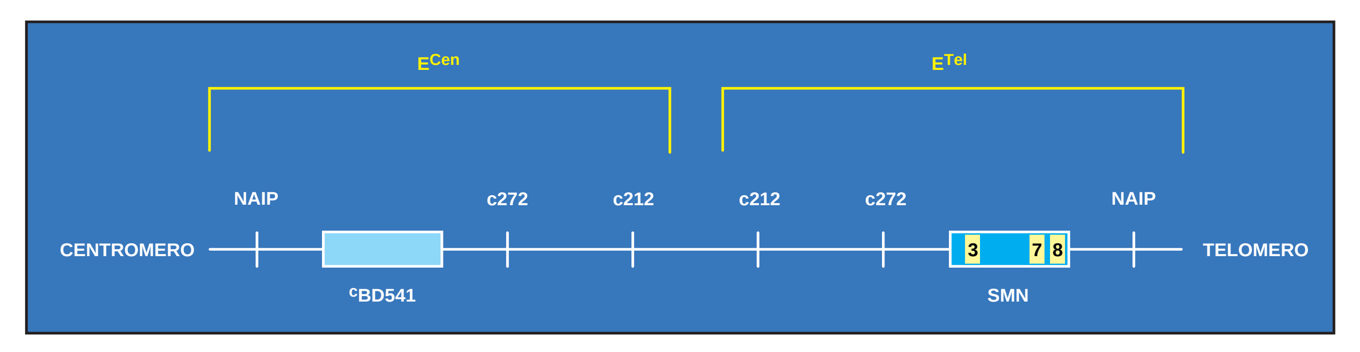
Origen

La atrofia muscular espinal (AME) se caracteriza por la degeneración de las células del asta anterior de la médula espinal. En virtud de ello se produce una debilidad generalizada y una atrofia progresiva de los grupos musculares. Entre las de origen genético con un patrón de herencia autosómico recesivo, esta enfermedad neuromuscular ocupa el segundo lugar en frecuencia después de la fibrosis quística, y así constituye una de las principales causas hereditarias de mortalidad infantil. No se dispone de ningún tratamiento eficaz para remediar este trastorno, pues se desconoce el defecto bioquímico implicado.

A tenor de la gravedad de los síntomas, la edad de aparición y su evolución, se han configurado tres grupos de AME. La forma aguda (tipo I o enfermedad de Werdnig-Hoffmann) se manifiesta en el período neonatal o en los primeros meses de vida. Los afectados nunca alcanzan la capacidad de sentarse y mueren antes de los dos años de vida. La forma intermedia (tipo II) y la forma crónica (tipo III o enfermedad de Kugelberg-Welander) son clínicamente más heterogéneas.

En la forma intermedia de atrofia, los síntomas aparecen antes de los 18 meses, los pacientes no llegan a deambular y la muerte se produce después de los dos años. En la forma de tipo III los síntomas se presentan a partir de los 18 meses, los enfermos llegan a deambular y en general alcanzan la edad adulta.

Los estudios de ligamiento genético iniciados en 1990 demostraron que el gen responsable de las tres formas de AME se alojaba en el cromosoma 5q13, circunstancia que permitía sospechar que los tres tipos clínicos eran formas alélicas de un mismo gen. Con el refinamiento de las técnicas se pudo acotar mejor el segmento responsable. Para, posteriormente, llegar a la obtención de cromosomas artificiales de levadura



Esquema de la región cromosómica 5q13 que contiene dos elementos repetidos E^{tel} y E^{cen}; en ellos se alojan los genes SMN (gen de la supervivencia de la motoneurona), NAIP (gen de la proteína inhibidora de la apoptosis neuronal) y ^{c}BD541. En el gen SMN se indican los exones 3, 7 y 8. En el exón 3 se localiza la mutación recurrente del AGAG, presente en el 7 % de la población española afectada de atrofia muscular espinal. Los exones 7 y 8 del gen SMN (cuya secuencia difiere del gen cBD541) se utilizan para la detección de la deleción mayoritaria que se observa en los pacientes de AME. Los microsatélites c212 y c272 SE se hallan también incluidos en dichos elementos; contribuyeron en un comienzo a la caracterización de las primeras deleciones descritas en la región

(YAC) contiguos entre los que estaba contenida la región candidata, y así abordar su estructura. Sabemos así que dicha región se caracteriza por la presencia de elementos homólogos y repetidos que la hacen inestable. El hallazgo de una frecuencia alta de deleciones en los enfermos de AME (heredadas *de novo*) confirmaba dicha inestabilidad.

Así las cosas, en enero de 1995 un grupo de investigadores del Hospital Necker de París dirigido por Judith Melki identificaron y caracterizaron, en la región 5q13, el gen SMN (acrónimo de "survival motor neuron", o gen de la supervivencia de la motoneurona) como determinante de la AME. El gen SMN consta de ocho exones. Se transcribe en un ARN mensajero de 1,7 kilobases. Aunque se expresa en tejidos muy dispares —corazón, cerebro, placenta, pulmón, hígado y riñón—, abunda sobre todo en el tejido muscular. La proteína que codifica no presenta homología con ninguna conocida; su peso molecular estimado es de 32 kilodaltons. Se ignora el modo en que dicha proteína provoca la enfermedad y condiciona el desarrollo de la misma.

El gen presenta dos copias, una telomérica o gen SMN y otra centromérica, denominada ^{c}BD541. El análisis de su secuencia respectiva ha puesto de manifiesto que ambos genes son prácticamente idénticos: sólo difieren en cinco sustituciones de una base (tres en los intrones 6 y 7; una en el exón 7 y otra en el 8). Para algunos autores, el gen centromérico cifraría una proteína idéntica a la codificada por el gen SMN, producción sin embargo que resultaría insuficiente para el buen funcionamiento de la célula.

El gen SMN está delecionado o interrumpido en el 98 % de los pacientes, cualquiera que sea la forma clínica de la enfermedad que presente. En el 2 % restante se advierten deleciones pequeñas o mutaciones puntuales; se corrobora así que las alteraciones en el gen SMN contribuyen al fenotipo AME.

Simultáneamente al descubrimiento del equipo francés, *Cell* publicó las investigaciones realizadas por un grupo dirigido por Alex Mac Kenzie. Habían caracterizado otro gen de la región, denominado NAIP (acrónimo de "neuronal apoptosis inhibitor protein", proteína inhibidora de la apoptosis neuronal), que también estaba duplicado; observaron que este segundo gen aparecía delecionado en la mitad de los pacientes con AME tipo I.

En los pacientes españoles afectados de AME se ha encontrado que el 93 % de los enfermos tienen delecionado o interrumpido el gen SMN. El 7 % restante de los afectados presenta una deleción de 4 pares de bases (AGAG) en el codon 133-134 del exón 3 del gen SMN que producía un codon de finalización prematuro. Se trata de una mutación que se da en los tres tipos de AME. Su identificación constituye un hallazgo muy importante, por un doble motivo: es la segunda mutación recurrente y su caracterización confirma la hipótesis que atribuye la atrofia muscular espinal a las mutaciones en el gen SMN.

A pesar de que los pacientes con el tipo I de AME presentan deleciones de mayor tamaño porque en dicha forma clínica participa también el gen NAIP, con los estudios actuales no puede determinarse una clara relación fenotipo-genotipo. Más aún, la mera existencia de hermanos, dentro de algunas familias de AME cuyos hermanos no afectados presentan una deleción similar a los enfermos, respalda la posibilidad de que intervengan otros factores genéticos y ambientales en la manifestación de la enfermedad.

El clonaje y la identificación de mutaciones en los genes SMN y NAIP permite confirmar el diagnóstico clínico en la mayoría de los enfermos de AME. Asimismo, contribuirá en un plazo no lejano a un mayor conocimiento de la relación fenotipo-genotipo y a la determinación de los sectores de genes y proteínas involucrados en su correcto funcionamiento neuronal.

ELENA BUSSAGLIA
Hospital de la Santa Cruz
y San Pablo. Barcelona

Aletas de teleósteos

Desarrollo y regeneración

Antes de establecer las bases de la genética de metazoos, Thomas H. Morgan dedicó unos años al estudio de la regeneración en diversos organismos. El padre de la genética de *Drosophila* propuso la existencia de "tensiones o relaciones de presión que inician el crecimiento, gobiernan la restitución de la forma y causan el cese del desarrollo" durante la regeneración de las aletas de teleósteos. En 1927, S. Milton Nabrit publicaba los resultados de sus experimentos y destacaba otro fenómeno interesante: durante la regeneración, la dimensión de cada raya contribuye aditivamente a la forma final de la aleta.

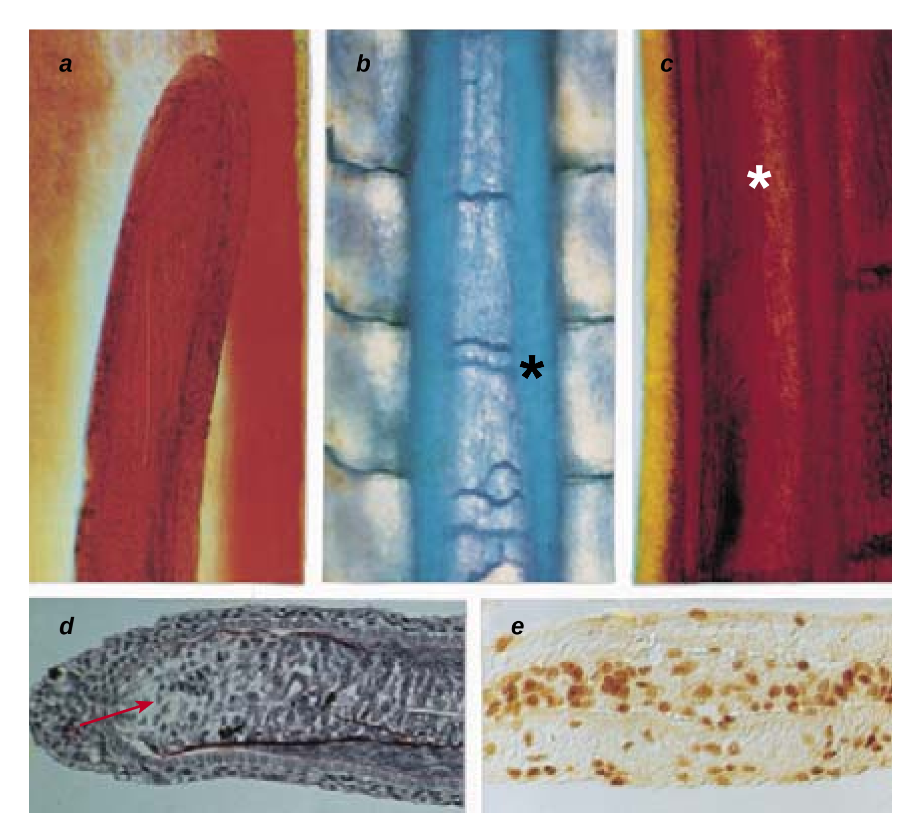
Casi cincuenta años después, en 1976, V. French, S. y P. Bryant pu-

blicaron en *Science* ciertas reglas topológicas para las interacciones locales entre células que controlan la regeneración de apéndices de vertebrados y artrópodos. La regeneración de las aletas, no considerada por estos autores, podría cumplir dichas reglas, y las "tensiones" de Morgan resultar ser interacciones celulares a corta y larga distancia, establecidas por un fino control genético.

Las aletas de los peces teleósteos están formadas por un esqueleto óseo dérmico y otro endocondral. El esqueleto dérmico se organiza en lepidotriquios, o rayas, que se articulan sobre los huesos radiales del basipterigio unidos por una musculatura que permite el movimiento acompasado durante la natación. Cada raya está constituida por dos estructuras yuxtapuestas y simétricas (hemirrayas), unidas por ligamentos. En la mayoría de las especies de peces estudiadas, la amputación de todas las rayas promueve una regeneración que restituye la forma y dimensiones originales, mediante la creación de un blastema apical de células proliferantes. El corte de los ligamentos permite la disección experimental de este proceso, mediante el análisis de regeneraciones parciales de cada componente.

Hemos centrado nuestro estudio en la especie *Carassius auratus*, un ciprínido. Además del análisis morfométrico de los segmentos de las rayas regenerados tras amputaciones parciales, nos hemos ocupado del examen histológico de la división celular. Las respuestas regenerativas nos permiten inferir los posibles mecanismos celulares básicos.

A través de un estudio estadístico, que consistió en efectuar un análisis de componentes principales sobre los descriptores morfométricos de las rayas regeneradas bajo distintas condiciones experimentales, descubrimos diferencias significativas entre los segmentos de las rayas que servían de control y las manipuladas experimentalmente. Los cambios morfométricos afectan a la anchura, segmentación, bifurcación y simetría (dorsal/ventral y derecha/izquierda) de las hemirrayas. En su conjunto, estos resultados sugieren la intervención de interacciones celulares locales y entre las dos superficies de cada hemirraya durante la regeneración. En uno de estos experimentos, la regeneración de blastemas aislados por el corte del tejido interradial, se observó que la segmentación y la bifurcación de las rayas desaparecían. Esto denuncia la existencia de otras interacciones celulares a más larga distancia, entre blastemas vecinos, necesarias para tales procesos.



Cada raya del esqueleto dérmico de las aletas de los peces teleósteos puede regenerarse por separado. Para observarlo, nos servimos de una inyección iontoforética (que utiliza un campo eléctrico como fuerza impulsora) de la lectina concanavalina A (a). *La formación del patrón de segmentación y bifurcación de los lepidotriquios depende de interacciones locales entre células del mismo blastema* (asterisco en b) *o entre blastemas vecinos* (asterisco en c), *como sugiere su perturbación en condiciones experimentales. De igual modo, las interacciones entre epidermis apical y blastema* (flecha en d) *afectan al reclutamiento de células blastémicas, las segmentaciones y bifurcaciones coincidentes de los lepidotriquios. Dichas coincidencias son el reflejo de un orden simétrico del patrón de proliferación (replicación del ADN) de todas las células en el ápice* (e)

La inyección de moléculas que puedan bloquear la transmisión de estas señales podría revelar, también, algunos de estos mecanismos. La concanavalina A, que induce la regeneración ectópica de los rayas, y el ácido retinoico, que tiene varios efectos sobre la proliferación, la apoptosis (muerte celular programada) y la identidad de cada lepidotriquio, dependiente de la dosis utilizada, son pruebas que revelan la importancia de la epidermis apical en la síntesis de señales inductoras.

A través de un sistema sencillo, como el de las aletas, podemos analizar las interacciones celulares implicadas en el control de la proliferación, diferenciación de los segmentos e identidad de las rayas durante su regeneración. La expresión restringida de genes de secuencia similar a reguladores de los procesos anteriores en otros organismos, nos permite proponer la naturaleza molecular de las señales implicadas en dicho control y la comparación interespecífica. Para someter a prueba esta hipótesis se requiere, además, el estudio de mutantes. Experimentos realizados en varias universidades americanas y en el laboratorio de C. Nüsslein-Volhard describen nuevas mutaciones en otro pez *Brachydanius rerio*, abriendo la posibilidad de experimentos genéticos que puedan dar una explicación molecular a las "relaciones de presión" de Morgan. El estudio de sus regulaciones génicas y, sobre todo, del control de la proliferación en el establecimiento de las dimensiones, permitirá diseccionar este proceso evolutivo asociado a la conquista del ambiente terrestre.

MANUEL MARÍ-BEFFA Y
JOSÉ BECERRA RATIA
Universidad de Málaga

De cerca

Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

Polinización del colibrí



Quizá la imagen del colibrí libando sea una de las más espectaculares y de las que casi todo el mundo tiene memoria fotográfica. Menos familiar resulta el conocimiento de la estrecha relación que esos pajarillos guardan con las flores que polinizan. Las flores adaptadas a la polinización por aves son de un rojo o amarillo vivos. La coloración roja, en particular, resulta muy conspicua para estos vertebrados; los insectos, por contra, apenas la diferencian de un fondo gris general. Curiosamente, estas flores son más hurañas en otros rasgos relacionados con el polinizador; así, no disponen de plataforma de aterrizaje, ni huelen (o por lo menos su olor es imperceptible a los humanos), probablemente porque la sensibilidad olfatoria de las aves es baja. Retienen muy dentro el néctar, al que sólo llegan las aves de pico largo, movidas por la necesidad de combustible de alta energía para su metabolismo acelerado.

Para flor atractiva, la del seibo (*Erythrina crista-galli*). Este árbol de la familia de las leguminosas recorre buena parte de América del Sur; medra sobre todo en las zonas abiertas muy húmedas e incluso inundadas, donde forma parte característica del bosque en galería. Desde 1942, es la flor nacional de la República Argentina.

Su flor amariposada está adaptada a la polinización por colibríes, que en este caso es el picaflor bronceado (*Hylocharis chrysura*). Los observamos en el departamento de Uruguay, en una depresión colonizada por un bosquete de seibos en flor. Allí bajamos dispuestos a fotografiarlos. En eso andábamos, cuando aparecieron dos picaflores que se pusieron a libar. Seleccionamos el sector de flores que visitaban. Con flashes, y teleobjetivos de 300 mm nos situamos frente a las inflorescencias mejor iluminadas por el sol; para congelar el vuelo se necesita mucha luz, ya que se requiere sincronizar el flash a una velocidad alta. Tardamos cinco horas en conseguir las imágenes deseadas.



Redes nerviosas para la locomoción de los vertebrados

Los movimientos implicados en la natación, carrera y vuelo de los animales están controlados por determinadas redes nerviosas. Conocemos ya con bastante pormenor ese tramado en la lamprea, un pez ciclóstomo

Sten Grillner

Es difícil hacerse una idea cabal de cómo consigue el cerebro humano controlar y tener a punto todo lo que se requiere para correr o incluso para andar: decidir qué articulaciones han de moverse, exactamente cuándo y cuánto hay que flexionarlas y, por último, enviar por vía nerviosa la serie de impulsos adecuada para activar la combinación idónea de músculos. La destreza que se advierte hasta en los organismos más primitivos cuando nadan, vuelan o corren, es decir, cuando propulsan su masa corporal por el medio que les envuelve, resulta en verdad asombrosa. El más perfecto de los robots se desenvuelve con torpeza, comparado con cualquiera de ellos.

Aunque son muchos los misterios que aún esconde la locomoción animal, los científicos empiezan ya a comprender cómo los vertebrados, incluido el hombre, coordinan con suma facilidad los movimientos más complicados en los que intervienen centenares de músculos. La tarea formidable que representa el control de los diversos movimientos del animal se simplifica por una organización nerviosa, realmente notable, que distribuye las funciones de coordinación de estas acciones entre distintas redes de neuronas. Algunos de los circuitos especializados, como el que mantiene en actividad ininterrumpida la respiración, operan a la perfección desde el mismo momento del nacimiento. Otros, pensemos en los que controlan la reptación, la marcha o la carrera, tardan más tiempo en llegar a la maduración.

Denominamos generadores centrales de patrones a las redes nerviosas que coordinan movimientos específicos y reiterados. Pueden ejecutar una acción sin fallo, una y otra vez, y sin necesidad de realizar un esfuerzo consciente. Los circuitos fundamentales en que se apoya el hombre para respirar, tragar, masticar o realizar determinados movimientos del ojo están contenidos en el troncoencéfalo, que rodea la parte superior de la médula espinal. Resulta bastante curioso que los circuitos de los que depende la marcha o la carrera (así como algunos reflejos protectores) no estén localizados en el cerebro, sino que residan en la propia médula espinal.

Desde finales de los sesenta, mis colaboradores y yo venimos empeñados en esclarecer el diseño de los sistemas neurales que coordinan los movimientos de la marcha en diversos animales de experimentación, confiados en que habrían de aportar algo de luz sobre las complejidades del sistema nervioso del hombre. Es mucho lo que aún queda por averiguar, pero podemos ya ofrecer un esquema de las redes nerviosas responsables del movimiento en un vertebrado muy simple, el de la lamprea, un pez ciclóstomo.

Basándose en estudios realizados con animales de laboratorio, los científicos han obtenido abundante información sobre la organización del sistema nervioso central. La misma apreciación del significado de la médula espinal en la locomoción arranca ya de comienzos de siglo, con los trabajos pioneros de los neurofisiólogos Charles S. Sherrington y T. Graham Brown. Observaron éstos que los mamíferos con la médula espinal seccionada podían realizar movimientos alternativos de la pierna, aun cuando la conexión con el cerebro estuviera interrumpida. Mucho después, pudimos demostrar definitivamente en mi laboratorio que tales movimientos correspondían a los movimientos implicados en la locomoción. De ese modo llegamos a la conclusión de que los patrones de las señales nerviosas esenciales para la locomoción se generaban por entero en la médula espinal.

Seguía, sin embargo, abierta la cuestión del control cerebral de tales circuitos, de cómo el cerebro selecciona los que deben activarse en un determinado momento. Se avanzó bastante en el desentrañamiento de ese proceso durante los años sesenta, cuando Grigori N. Orlovski y Mark L. Shik, entonces en la Academia de Ciencias de Moscú, demostraron que, en el gato, cuanto más se activaban regiones específicas del troncoencéfalo, con tanta mayor rapidez se movía el animal. A medida que se aumentaba el grado de estimulación, el felino pasaba de una marcha lenta a un trote y, por último, a un galope. Vióse que una señal de control muy simple de un área restringida del troncoencéfalo

1. EL APARATO LOCOMOTOR del hombre, como el de cualquier vertebrado, está sometido al control regulador del sistema nervioso central. Circuitos neuronales especializados en el prosencéfalo (*rojo*) seleccionan entre una serie de "programas motores" y activan zonas específicas del tallo cerebral (*azul*). El troncoencéfalo inicia, a su vez, la locomoción y controla la velocidad de estos movimientos excitando redes neurales (conocidas como generadores centrales de patrones), que se alojan en la médula espinal (*púrpura*). Estas redes locales contienen los circuitos de control necesarios para iniciar y detener, en el momento oportuno, las contracciones musculares que participan en la locomoción. Redes neuronales del troncoencéfalo controlan también la respiración, la masticación, la salivación, el movimiento de los ojos y otros patrones motores que se repiten con frecuencia.

podía generar patrones complejos que afectaban a un elevado número de músculos del tronco y de las extremidades al activar los generadores de patrones para la locomoción ubicados en la médula espinal del gato.

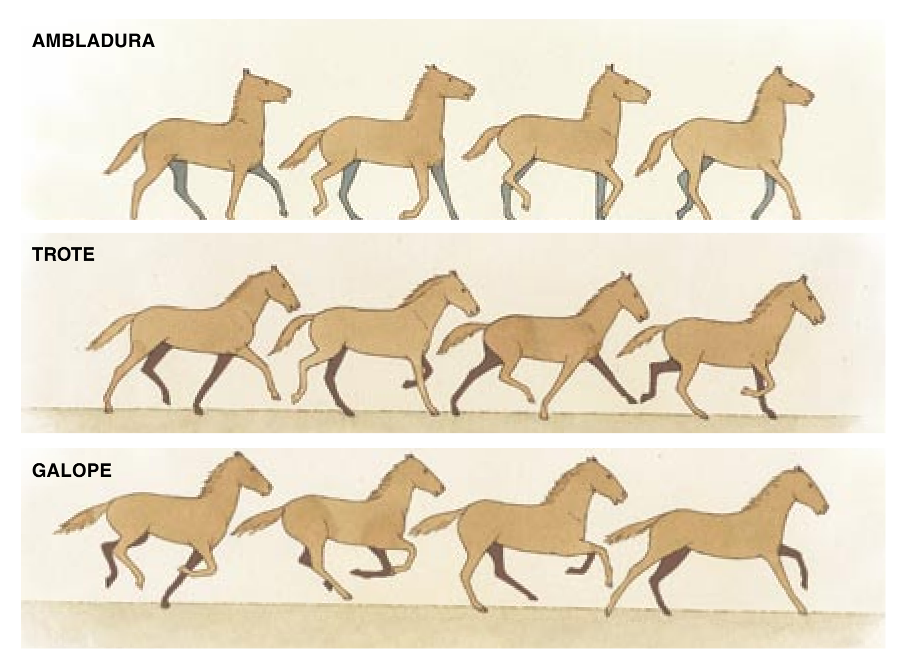
Además de proporcionar claves para entender la interacción entre cerebro y médula espinal, el experimento ruso contribuyó a explicar el movimiento de los animales, aun cuando se les hubiera seccionado buena parte de la masa cerebral. Algunos mamíferos (entre ellos, la rata común de laboratorio) siguen siendo capaces de moverse, correr y mantener cierto grado de equilibrio incluso después de la ablación del prosencéfalo. Aunque su marcha recuerde la de un robot, sin esforzarse por evitar los obstáculos interpuestos en su camino, estos animales no pierden la capacidad de mover los músculos de sus patas y de coordinar el paso.

Comportó muchos años de estudio conocer el mecanismo en virtud del cual el cerebro activa las redes nerviosas de la médula. Por fin sabemos que los ganglios basales, grandes grupos de neuronas del prosencéfalo, se conectan (directamente o a través de otras células interpuestas que actúan de relés) con neuronas del troncoencéfalo, que, a su vez, pueden iniciar diferentes "programas motores". En condiciones de reposo, los ganglios basales inhiben sin cesar los centros motores del cerebro, de modo que no se produce ningún movimiento. Pero cuando esa inhibición activa se relaja, comienzan a producirse los movimientos coordinados. Los ganglios basales mantienen, pues, bajo un estricto control todos y cada uno de los programas motores. Este freno es imprescindible; en efecto, la operación anárquica de un programa motor podría acarrear consecuencias desastrosas para los animales.

Sea por caso el hombre. Las enfermedades de los ganglios basales pueden causar expresiones faciales y movimientos de manos y extremidades involuntarios. Esta hipercinesia se da con frecuencia en la parálisis cerebral y en la enfermedad de Huntington; es subsecuente también a cierta medicación. Otras enfermedades de los ganglios basales pueden conducir a la situación opuesta y provocan una inhibición más allá de lo deseable, que se manifiesta en la dificultad para iniciar los movimientos. El ejemplo mejor conocido de esta incapacidad nos lo ofrece la enfermedad de Parkinson.

Pese al empeño de la investigación clínica en entender cómo se producen tales trastornos neurológicos y qué podría hacerse para corregirlas, el progreso ha sido lentísimo, dada la extraordinaria complejidad que reviste el sistema nervioso del hombre (integrado por casi un billón de neuronas). No podemos todavía examinar con cierto detalle los circuitos neurales del hombre, ni, dicho sea de paso, de cualquier otro mamífero. De ahí que mis colaboradores y yo nos hayamos centrado en vertebrados de organización más sencilla. Es decir, hemos escogido un animal experimental con una organización nerviosa básica que fuera idéntica a la del hombre, aunque con muchos menos componentes.

Nuestro enfoque fundamental semeja el que seguiría un imaginario investigador que llegara a nuestro planeta dispuesto a descifrar la mecánica básica del automóvil. Para ese científico extraterrestre sería más acertado comenzar con un sencillo Ford Modelo T (si lograra hacerse con esa pieza de museo); ese vehículo primitivo contaba ya con todos los componentes esenciales del coche —motor de combustión interna, frenos y caja de cambios— y al mismo tiempo construido según un diseño sencillo y fácilmente accesible para la inspección. Las investigaciones que empezaran por otro modelo más avanzado, como pudiera ser un Ferrari con turbinas, podrían llevar a la frustración. No parece excesivamente aventurado suponer que el conocimiento de un Modelo T puede proporcionar el fundamento para comprender la anatomía del coche más elegante y refinado.



2. GENERADORES DE PATRONES, redes neurales independientes que controlan cada miembro, interaccionan de suerte diversa para producir distintos pasos, como la ambladura, el trote o el galope del caballo. En la ambladura (*arriba*) el animal mueve a un tiempo el pie y la mano de un mismo lado. En el trote (*medio*) las extremidades se mueven en diagonal, es decir, con un apoyo bípedo alterno de mano y pie contrapuestos. En el galope (*abajo*), han de actuar conjuntamente ambas manos y después ambos pies.

Ensayamos con distintas posibilidades antes de decidirnos por la lamprea, un pez alargado que carece de mandíbula y que tiene la boca adaptada para la succión. La lamprea es un vertebrado primitivo con un sistema nervioso constituido por un número bastante pequeño de células (unas mil en cada segmento de la médula espinal), lo que la hace ideal para nuestro propósito. El ciclóstomo reunía otra ventaja adicional. Carl M. Rovainen, de la Universidad de Washington, había demostrado que su sistema nervioso central podía mantenerse en una placa de cultivo y someterlo a estudio durante varios días después de haberlo extirpado del animal. Además, las redes motoras en el sistema nervioso aislado permanecen activas.

Esa estrategia de optar por un organismo elemental y al mismo tiempo muy pertinente para el tema ha permitido profundizar en procesos biológicos muy diversos. Pensemos, por ejemplo, en el examen de las neuronas de invertebrados, como el calamar y la langosta, que aportó las primeras claves para entender la generación de impulsos nerviosos y el funcionamiento de las redes de neuronas.

Desde el comienzo de nuestros estudios con la lamprea a finales de los años setenta, mi colaborador Peter Wallén junto con otros y yo mismo hemos dirigido nuestra atención a los rasgos fundamentales de su natación. Al igual que otros peces, la lamprea se autopropulsa hacia delante contrayendo los músculos en una ola ondulante que recorre todo su cuerpo, desde la cabeza hasta la cola.

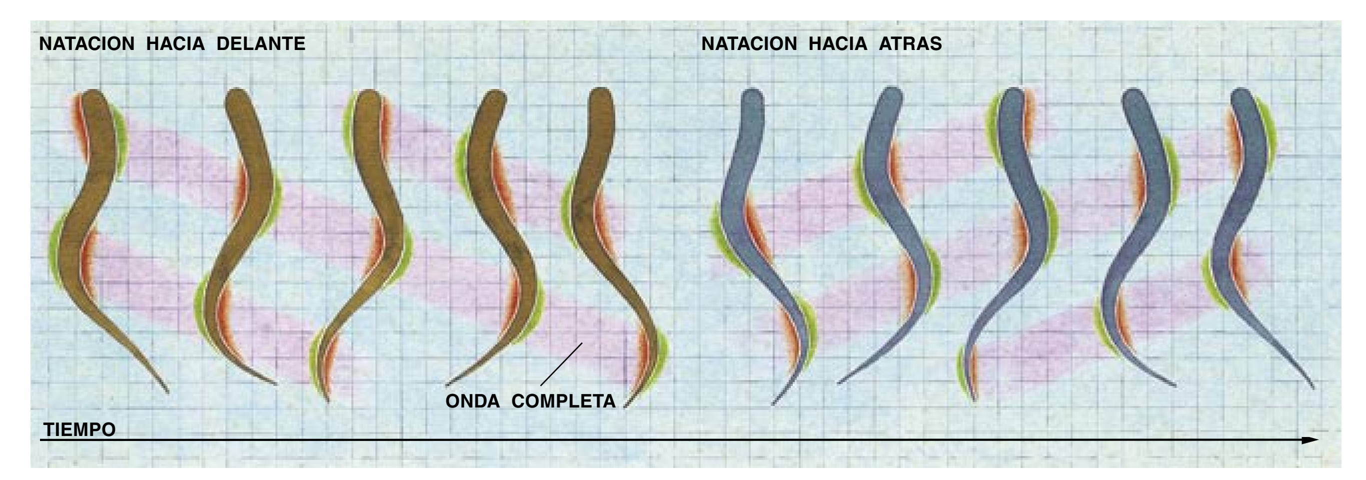
Para producir esta onda de propulsión, el animal ha de generar pulsos de actividad muscular que arqueen cada sección de su espina dorsal hacia un lado y, luego, hacia el opuesto en alternancia rítmica. Pero la lamprea necesita también coordinar las contracciones de segmentos consecutivos a lo largo de su cuerpo, de suerte que se forme una ola suave. No nos costó descubrir que los controles nerviosos de una y otra capacidad están distribuidos por toda la médula espinal. Si extraemos la médula espinal de una lamprea, y la seccionamos, observaremos que cada fracción muestra el patrón alternante característico; comprobaremos, asimismo, que, en el seno de cada porción, la actividad entre los segmentos vecinos sigue estando coordinada.

La investigación ulterior puso de manifiesto que la demora en la activación de los segmentos adyacentes permanecía invariable durante una determinada onda, conforme el movimiento ondulatorio a lo largo del cuerpo del pez iba propagándose desde la cabeza hacia la cola. Ahora bien, la demora cambia con la velocidad de la lamprea, y por tanto el período total de la onda (el tiempo que invierte ésta en recorrer todo el cuerpo) varía entre unos tres segundos durante un desplazamiento lento y una décima de segundo en una aceleración brusca. Exactamente idénticas, aunque en sentido contrario, son las contracciones que se producen cuando el animal nada hacia atrás.

Para poder comprender el control regulador de tales movimientos por el sistema nervioso de la lamprea, necesitábamos determinar con exactitud qué neuronas intervenían en su natación y la forma en que se relacionaban. Hubimos, pues, de preparar experimentos en que hacíamos uso de electrodos cuya punta fuera de un diámetro inferior a la milésima de milímetro. Con la ayuda de tales sensores conseguimos cartografiar conexiones remotas: colocábamos un electrodo en el interior de una neurona del troncoencéfalo, al tiempo que el otro electrodo servía para detectar las células diana de la médula espinal. Pero dar con el par de neuronas que se comunicaran entre sí, en medio de centenares de posibilidades, requería una dosis considerable de pericia y paciencia. Dificultad que superamos con el trabajo cuidadoso y diligente de muchas personas. Pudimos, pues, identificar las neuronas que controlaban la locomoción y reseguir los circuitos que las conectaban.

Descubrimos, por fin, qué neuronas del troncoencéfalo poseían prolongaciones alargadas (axones) que estaban en contacto con las neuronas situadas a lo largo de la médula espinal y que se hallaban involucradas en la locomoción. En respuesta a las señales del cerebro, las redes locales de células incluidas en ciertas zonas de la médula generan pulsos de actividad nerviosa. Estas redes actúan como circuitos especializados; excitan las neuronas de un lado de un segmento determinado del cuerpo de la lamprea, mientras que anulan neuronas similares del lado opuesto. Así, cuando se activa un flanco de una sección, el otro se inactiva automáticamente. Otras células nerviosas especializadas, las motoneuronas, ponen en conexión los nervios de la médula espinal con las fibras musculares responsables de la natación.

Pero tales redes medulares no se limitan a franquear el paso de las señales emitidas por el cerebro. Aunque el troncoencéfalo es el que dicta la orden de que el pez nade, delega la tarea de coordinar los movimiento

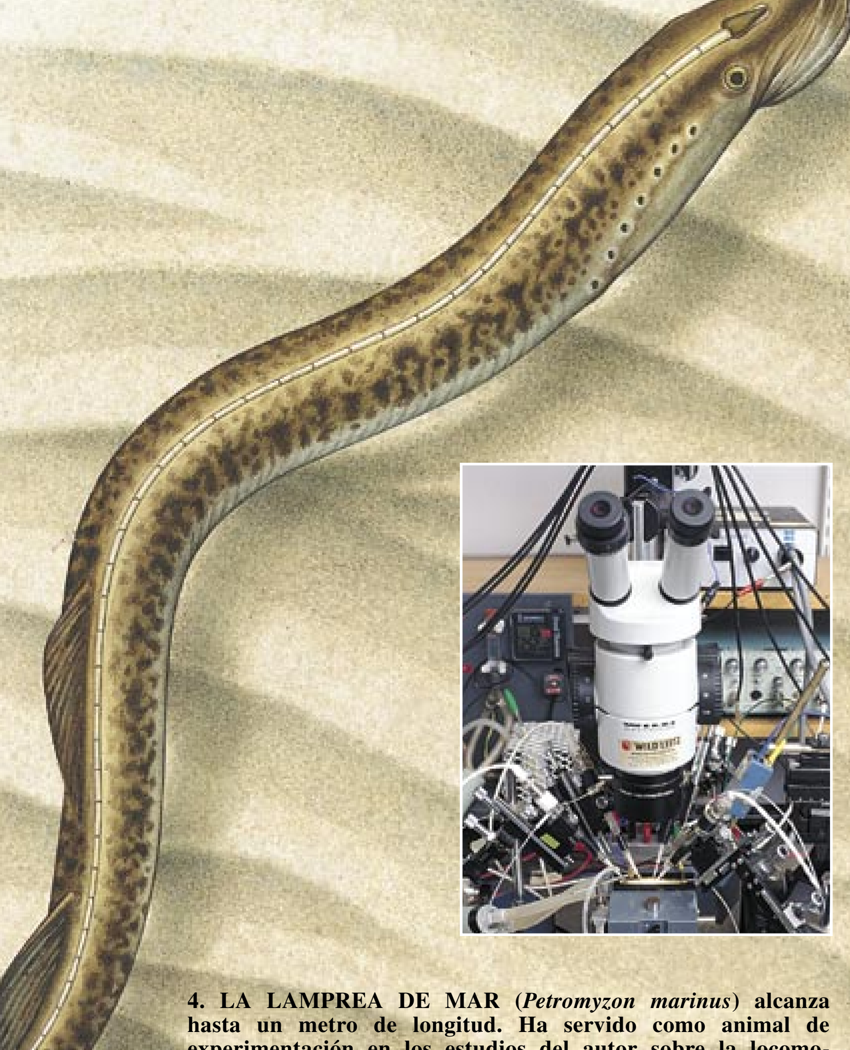


3. LOS MOVIMIENTOS ONDULATORIOS que la lamprea realiza en su natación constituyen una forma bastante elemental de locomoción en los vertebrados, cuyo estudio pueden acometer con éxito los neurólogos. En respuesta a señales emitidas por el cerebro, una onda tras otra de contracciones musculares (*rojo*) y de extensión (*verde*) se desplazan desde la cabeza hasta la cola, a lo largo de todo el cuerpo del ciclóstomo, propulsándole agua adelante (*izquierda*). Ondas semejantes se propagan en sentido inverso por el cuerpo del pez, permitiéndole nadar hacia atrás (*derecha*).

musculares a estos grupos locales, que pueden procesar los datos procedentes de los sentidos y ajustar su propio comportamiento de acuerdo con los mismos. En particular, reaccionan ante los impulsos que le llegan de neuronas específicas con “receptores de estiramiento”, que perciben las contorsiones de la espina dorsal de la lamprea en sus movimientos natatorios.

A medida que un lado del cuerpo se contrae, el opuesto se distiende; esta distensión provoca el disparo de dichos receptores especiales. Las neuronas activadas realizan una acción complementaria: o bien excitan neuronas del lado distendido (induciendo allí la contracción muscular) o bien inhiben las neuronas del lado opuesto, instándoles a que suspendan la contracción. Mediante estos procesos (así como por algunos otros mecanismos celulares relativamente complejos) se mantienen los movimientos oscilatorios fundamentales del sistema neuromuscular de la lamprea.

Conforme nos adentrábamos en los circuitos neurales de la médula espinal de la lamprea, vimos que las



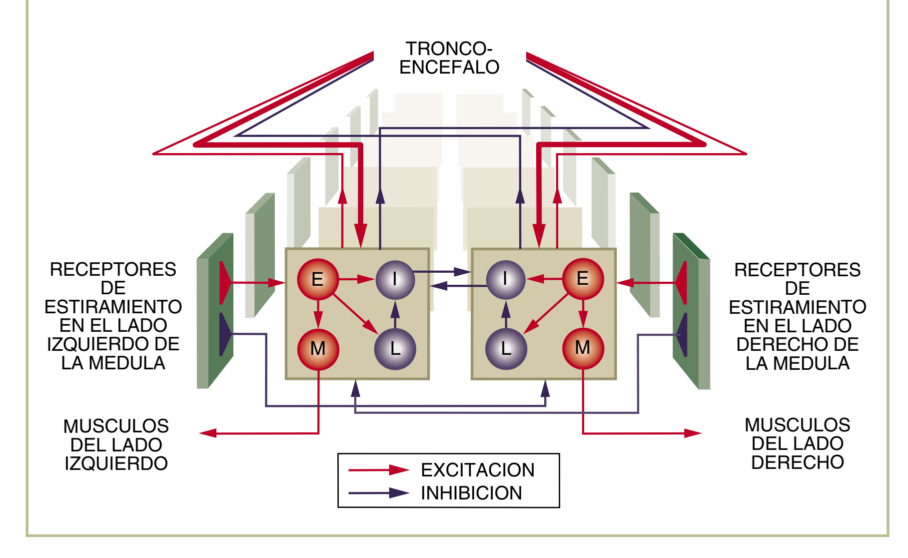
4. LA LAMPREA DE MAR (*Petromyzon marinus*) alcanza hasta un metro de longitud. Ha servido como animal de experimentación en los estudios del autor sobre la locomoción de los vertebrados. El número relativamente pequeño de células que constituyen el troncoencéfalo (*marrón*) y la médula espinal (*beige*) pueden aislarse para su investigación en el laboratorio (*fotografía*).

Procesamiento en paralelo

Dentro de cada segmento de la médula espinal de la lamprea existe una compleja red de neuronas conectadas entre sí. El troncoencéfalo envía señales que excitan grupos de neuronas (*cajas*) situadas a la izquierda y a la derecha de la médula. Algunas neuronas especializadas de estos grupos responden enviando señales excitadoras (*rojo*) o inhibidoras (*púrpura*) a las células vecinas. Las neuronas E (excitadoras) instaladas en un lado del segmento medular activan las motoneuronas (M), que a su vez inducen la contracción de los músculos de ese mismo lado del pez. Estas células E también actúan sobre células inhibidoras (I) que responden reduciendo el nivel de excitación en el grupo de neuronas ubicadas en el costado opuesto de la médula, asegurando de este modo la relajación de los músculos de este mismo lado.

Los pulsos de excitación que causan la contracción en uno de los lados se extinguen de varias maneras. Determinadas neuronas receptoras del estiramiento (*triángulos de color púrpura*) que hay en el lado opuesto de la médula emiten señales inhibidoras de la contracción. Al mismo tiempo, otros receptores de estiramiento activados (*triángulos rojos*) excitan las neuronas del lado distendido para iniciar en él la contracción. Además, grandes neuronas inhibidoras (L) del lado en contracción pueden recibir del cerebro la orden de inhibir las células I. Esto permite que el lado opuesto se active y reexpida señales inhibidoras. Por último, existen varios mecanismos electroquímicos en el interior de las células que pueden rebajar la excitación, contribuyendo de este modo al control temporal de los flujos en la red.

Aunque estos circuitos locales de la médula espinal pueden operar con autonomía, lo normal es que reenvíen al cerebro información acerca de la actividad desarrollada en la red. Estas señales pueden combinarse entonces con otros datos sensoriales, como pueden ser ciertas claves procedentes de la visión o del sistema de equilibrio en el oído interno, para modificar los movimientos del animal.



redes nerviosas locales extendían sus axones por toda la médula. En cada segmento hay células inhibidoras especiales, que envían señales por estos axones en sentido caudal hasta una distancia aproximada de un quinto de la longitud de la médula. Las células excitadoras, por su parte, presentan axones ligeramente más cortos, que se extienden en ambos sentidos. De lo que se desprende que la actividad en un determinado punto de la médula puede influir en regiones adyacentes.

Pero, ¿cómo consiguen las señales que conectan diferentes segmentos generar el característico movimiento ondulante? Tras largas discusiones, propusimos que las señales nerviosas podrían excitar el segmento director (cercano a la cabeza de la lamprea), de suerte que la alternancia de las contracciones, en uno y otro sentido, fuese allí más rápida que lo que la médula tendería de suyo a oscilar. La segunda sección, inmediata, seguiría los rápidos movimientos de la primera (porque los dos segmentos están acoplados por medio de neuronas), aunque con un ligero retraso, ya que la sección más lenta trata de mantener el ritmo impuesto por la directriz. Razonando de un modo análogo, podría decirse lo mismo de la tercera sección que iría con un ligero retraso sobre la segunda, y así sucesivamente. Esta serie de demoras incrementadas, suponíamos, posibilitaría la ondulación uniforme de la lamprea.

Pese a la elegancia de nuestros diagramas de circuitos y a la abundancia de datos que habíamos acopiado sobre las propiedades de los distintos tipos de neuronas implicadas, tuvimos que contentarnos, durante mucho tiempo, con unos avances modestos. En nuestras manifestaciones no podíamos ir más allá de afirmaciones muy genéricas sobre el funcionamiento de estos complejos circuitos neurales. Para comprobar si la información que habíamos ido recopilando explicaba realmente los movimientos natatorios de la lamprea, nos asociamos con Anders Lansner y Örjan Ekeberg, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, con el fin de crear modelos de ordenador que simularan el proceso.

Comenzamos por crear un guión que remedara el comportamiento de las diferentes neuronas que intervenían en la locomoción. Simulamos luego en el ordenador la conjunción de todas las células implicadas en las interacciones. Estos ejercicios numéricos nos permitieron someter a prueba diversos mecanismos posibles, que después han terminado convirtiéndose en herramientas indispensables para el análisis de la organización nerviosa de la lamprea. Como los modelos de ordenador pueden generar un patrón de señales que refleja bastante bien lo que ocurre durante los movimientos reales, pudimos, por último, establecer con bastante solidez que los circuitos que hemos descifrado engloban partes esenciales de una amplia red de controles biológicos.

Nuestras simulaciones por ordenador no sólo demostraron la alternancia de contracciones en ambos lados de la médula, sino que además nos han permitido precisar nuestras ideas sobre el período de demora en la activación de segmentos adyacentes. Este retraso proviene de las neuronas que alcanzan la médula e inhiben segmentos en sentido caudal. Tales conexiones aseguran que el nivel conjunto de excitación sea máximo en la región anterior del animal, condición ésta que conduce a un retraso en la activación

STEN GRILLNER, doctor en medicina y en ciencias por la Universidad de Gotemburgo, dirige el departamento de neurociencias del Instituto Karolinska de Estocolmo.

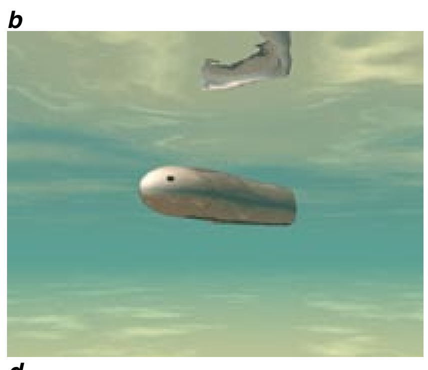
de los segmentos, uno tras otro, a lo largo del cuerpo del pez. Hemos visto también que puede invertirse el patrón normal aumentando la excitabilidad en la zona caudal de la médula, lo que permitiría al animal nadar hacia atrás. Los circuitos de la lamprea retienen, pues, dentro de su sencillez, un grado considerable de flexibilidad.

En las simulaciones de ordenador nos atuvimos sobre todo a la actividad neural. Ekeberg ha trabajado también en modelos que contemplan todo el ámbito de la lamprea, desde las fibras musculares que controlan los segmentos hasta las propiedades viscosas del agua que la envuelve. Los circuitos del control neural que habíamos cartografiado de antemano nos proporcionaron todo lo que necesitábamos para hacer nadar a esta lamprea virtual.

a



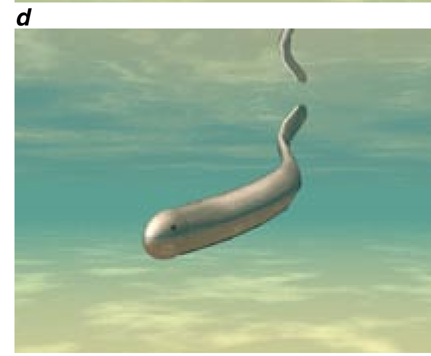
b



c



d



5. LA NATACION VIRTUAL de una lamprea simulada sugiere que los modelos neuronales desarrollados en el laboratorio pueden reflejar con bastante fidelidad los movimientos reales de estos animales en el agua. Estas imágenes generadas por ordenador muestran una lamprea nadando hacia delante en línea recta (*a*), volviéndose, (*b*) girando hacia un lado (*c*) y lanzándose en picado (*d*).

Con satisfacción lo decimos, conocemos ya las interacciones entre neuronas de la médula espinal que capacitan al pez para ejecutar sus movimientos. Pero, ¿podemos extrapolar estos mecanismos a otras formas de vida superiores? La lamprea se separó de la línea principal de los vertebrados en un momento precoz del curso evolutivo, hace unos 450 millones de años, cuando los vertebrados aún no habían desarrollado sus extremidades. Por tanto, no parecía algo inmediatamente obvio que nuestros resultados pudieran aplicarse a otros animales.

Pero no estamos solos. En el laboratorio de Alan Roberts, de la Universidad de Bristol, se ha estudiado también el mecanismo celular de la locomoción en otro vertebrado: el renacuajo. Ha sido para mí motivo de orgullo comprobar que el sistema nervioso del renacuajo se asemeja en muchos aspectos a la red nerviosa de la lamprea. También en el caso de otros vertebrados, de peces a primates, la organización neural se dispone, en sus grandes trazos, de acuerdo con un plan semejante. Ciertas regiones concretas del troncoencéfalo inician la locomoción y la médula espinal procesa las señales con la intervención de circuitos especiales.

Verdad es que, de momento, seguimos ignorando bastante sobre los mecanismos celulares que operan en estos otros animales. Se ha comprobado la presencia de generadores de patrones. Se han analizado ya algunos de sus componentes neurales, aunque hasta la fecha no ha sido posible desvelar su arquitectura interna. En estos últimos años, sin embargo, se ha avanzado mucho en el campo de la técnica que ha permitido aislar la médula espinal de otras clases de vertebrados (mamíferos, aves y reptiles), y es muy probable que en un futuro inmediato se descubran los mecanismos en virtud de los cuales estos otros grupos controlan la marcha, la carrera y el vuelo.

Puesto que los vertebrados primitivos conocían sólo la natación ondulatoria, las redes que más tarde se introdujeron para el control de aletas, patas y alas quizá no difirieran de las que mis colaboradores y yo hemos investigado. La evolución no suele abandonar un buen diseño; prefiere modificar y embellecer lo que ya existe. Nos sorprendería mucho descubrir que la semejanza entre la lamprea y el hombre, en lo concerniente a la organización de los mecanismos de control del sistema locomotor, se limitara a unos cuantos pormenores. Los científicos tendrán que encontrar la estrategia adecuada que permita cartografiar y activar circuitos “dormidos”, generadores de patrones en personas que hayan sufrido una sección medular. Habría que añadir que tal vez no estén tan lejos esos avances milagrosos de la ciencia médica: después de todo un Ferrari con turbopropulsión no deja de ser otro tipo más de coche.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEUROBIOLOGICAL BASES OF RHYTHMIC MOTOR ACTS IN VERTEBRATES. S. Grillner en *Science*, vol. 228, págs. 143-149; 12 de abril de 1985.

NEURAL CONTROL OF RYTHMIC MOVEMENTS IN VERTEBRATES. Avis H. Cohen, Serge Rossignol y Sten Grillner. John Wiley & Sons, 1988.

THE NEURAL CONTROL OF FISH SWIMMING STUDIED THROUGH NUMERICAL SIMULATIONS. Ö. Ekeberg, A. Lansner y S. Grillner en *Adaptive Behavior*, vol. 3, n.º 4, págs. 363-384, primavera de 1995.

NEURAL NETWORKS THAT CO-ORDINATE LOCOMOTION AND BODY ORIENTATION IN LAMPREY. S. Grillner, T. Deliagina, Ö. Ekeberg, A. El Manira, R. H. Hill, A. Lansner, G. N. Orlovski y P. Wallén en *Trends in Neuroscience*, vol. 18, n.º 6, páginas 270-279; junio de 1995.

Bases moleculares del tétanos y del botulismo

Las neurotoxinas responsables de estos dos síndromes son proteasas específicas que penetran en el interior de las neuronas y bloquean la liberación de neurotransmisores, provocando las típicas parálisis

Giampietro Schiavo, Ornella Rossetto y Cesare Montecucco

El tétanos y el botulismo son síndromes neuroparalíticos debidos a intoxicaciones con neurotoxinas proteicas producidas por bacterias anaerobias.

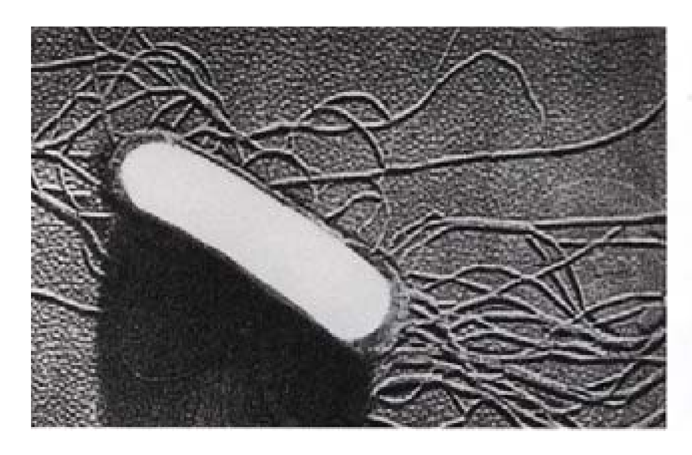
Sus síntomas, característicos y llamativos, han propiciado que el tétanos se conozca desde los albores de la medicina. El término procede del griego τέτανος, que significa "contracción". La enfermedad, descrita ya por Hipócrates hace veinticuatro siglos, se manifiesta a través de una contraccción muscular espasmódica y generalizada (parálisis espástica). Comienza en la musculatura facial y del cuello, para extenderse luego por la musculatura de la columna vertebral, del abdomen y de las articulaciones. La contracción de los músculos maseteros, que impide la separación de las mandíbulas, y la de los músculos mímicos originan *trismus* y *risus sardonicus*, dos aspectos distintivos del tétanos. El enfermo presenta disnea, sudoración copiosa e hipertermia. Pese al empleo de las modernas técnicas de reanimación, la enfermedad suele tener un desenlace fatal por colapso cardíaco e insuficiencia respiratoria. Incluso en el caso de que el paciente supere la fase aguda, acostumbran observarse secuelas y daños neurológicos permanentes. No suele darse en forma local, pero, si lo hace, la parálisis espástica se limita a una parte del organismo.

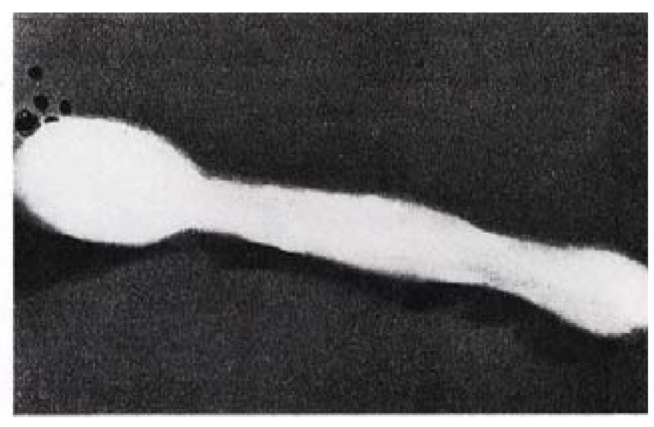
El botulismo, en cambio, ha pasado inadvertido más tiempo: sus síntomas son menos evidentes. Este término, derivado del latín *botulus* (longaniza), no aparece en la bibliografía médica hasta finales del siglo XVIII, cuando se produjo un caso de botulismo localizado en Alemania: trece personas habían comido ciertos embutidos y de ellas murieron seis. Al contrario de lo observado en el sujeto con tétanos, el afecto de botulismo presenta una parálisis fláccida, caracterizada por debilidad muscular y diplopía o confusión de los planos visuales, que incapacita, por ejemplo, para calentar algún objeto al fuego. También produce pérdida del reflejo a la luz. Se observa dificultad de movimiento y de la deglución, por debilidad, pérdida de coordinación de los músculos faríngeos y ausencia de salivación. Después se acompaña de pérdida de control de los esfínteres y de los músculos voluntarios, aunque el paciente se encuentre perfectamente consciente. La mortalidad por botulismo, aunque elevada, es inferior a la del tétanos y sobreviene por parálisis de los músculos respiratorios. En aquellas personas que lo superan, las manifestaciones clínicas desaparecen al cabo de unas semanas.

Durante siglos se sostuvo la tesis de la naturaleza neurológica del tétanos,



1. EL GRABADO del neurólogo escocés Charles Bell representa a un paciente afecto de tétanos como consecuencia de una herida sufrida en la batalla de La Coruña (15 de enero de 1809) entre ingleses y franceses.





2. ESTAS MICROGRAFIAS ELECTRONICAS de *Clostridium tetani* han sido obtenidas por Franco Scanga, de la Universidad de Roma. La microfotografía de la izquierda (a 20.000 aumentos) muestra una bacteria de cultivo en los primeros estadios: los flagelos peritriquios son numerosos y evidentes. En la microfotografía de la derecha (obtenida a 14.000 aumentos) se pone de relieve el engrosamiento de la espora subterminal —a cuya característica forma de maza debe el nombre el microorganismo— en una bacteria típica de un cultivo envejecido.

hasta que, en 1884, Antonio Carle y Giorgio Rattone, del instituto de patología general de la Universidad de Turín, demostraron la etiología infecciosa de la enfermedad. Lograron inducir el tétanos en conejos al inocularles material extraído de una pústula de un hombre que había muerto de tétanos. Poco después, el médico alemán Arthur Nicolaier identificó la bacteria como un bacilo alargado, a menudo con espora en posición subterminal. En 1889 Shibasaburo Kitasato, del instituto de higiene de la Universidad de Berlín, preparó un protocolo, utilizado desde entonces en innumerables ocasiones en microbiología, que permitía la obtención de cultivos de una bacteria esporulante. Calentando a 80 grados Celsius un caldo sembrado con pus tetánico, se logró matar las bacterias, pero no las esporas.

Al mismo tiempo, Guido Tizzoni y Giuseppina Cattani, del instituto de patología general de la Universidad de Bolonia, obtuvieron idénticos resultados con una técnica de pasos sucesivos sobre una lámina de agar. Se denominó a la nueva bacteria *Clostridium tetani* por la similitud de estos microorganismos generadores de esporas con una maza (*clostridium* en latín). Este resultado fue de importancia fundamental para la etapa siguiente: el descubrimiento de que el tétanos está originado por una toxina, como ya demostraran, en el Instituto Pasteur de París, Emile Roux y Alexandre Yersin para el caso de la difteria en 1888. En los filtrados acelulares de cultivos de *Clostridium tetani*, Tizzoni y Cattani en Bolonia y Knut Faber en Dinamarca lograron establecer en 1890 la presencia de una toxina proteica, la toxina tetánica, responsable última y única de todos los síntomas clínicos del tétanos. Así se demostró que el tétanos era una intoxicación, no una infección.

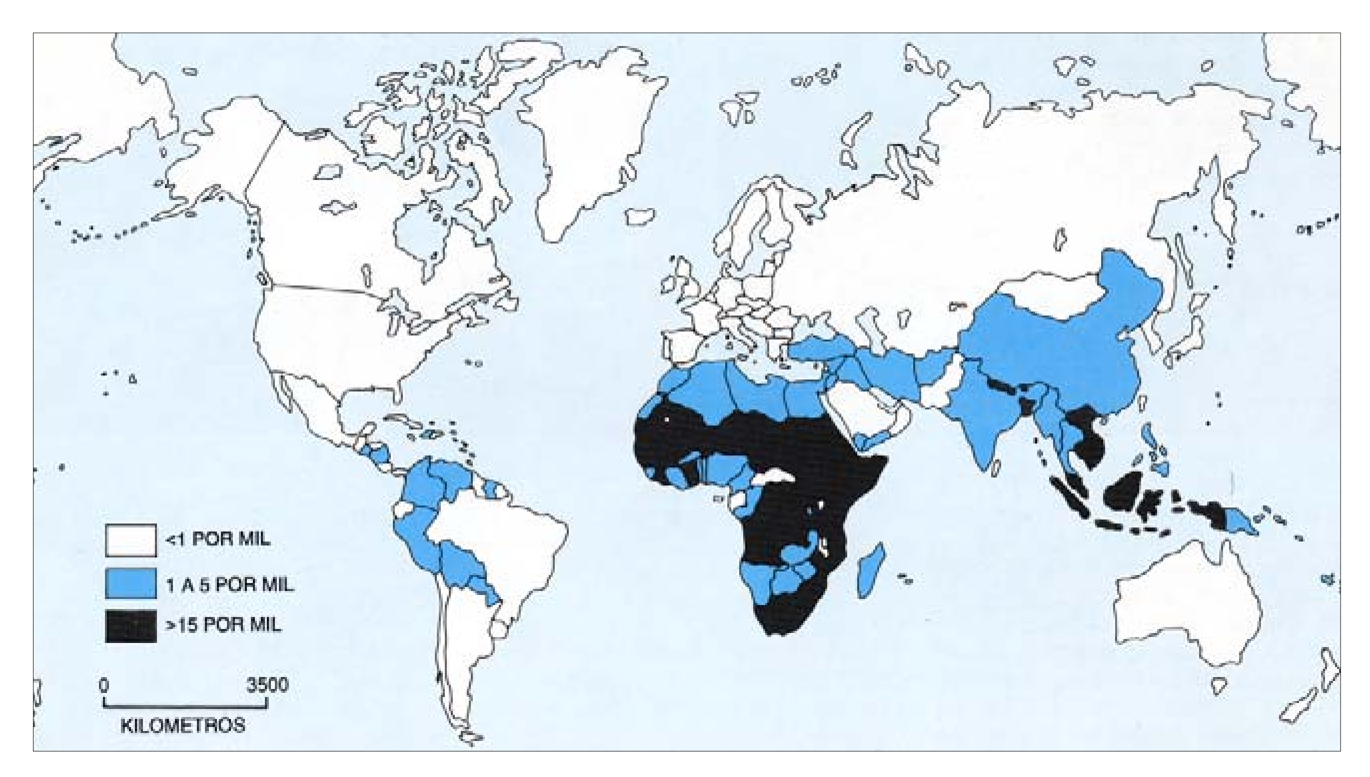
Sobre la base de este mismo procedimiento experimental, Emile van Ermengem, en Bélgica, analizando un caso de botulismo que involucró a varias personas que habían ingerido jamón ahumado, logró aislar otra bacteria, a la que dio el nombre de *Bacillus botulinum*. Demostró, asimismo, que también en el caso del botulismo la responsable era otra toxina proteica, producida por la bacteria si se cultiva en condiciones anaerobias. La bacteria fue después incluida en el género *Clostridium*; más tarde, se han identificado siete tipos inmunológicamente distinguibles de toxina botulínica a los que se denomina con letras de la A a la G. Los serotipos A, B y E (y rarísimamente F) están implicados en el botulismo humano. Los serotipos C y D se asocian casi exclusivamente al botulismo animal.

Estas toxinas son los venenos más potentes que se conocen. Bastan pocos nanogramos para matar a un hombre y, por tanto, no ha de extrañar que se haya considerado su empleo como arma biológica. Afortunadamente, aún parece muy remota esta posibilidad, dado que su toxicidad por vía oral o nasofaríngea es mucho más reducida.

Las esporas de *Cl. tetani* y de *Cl. botulinum* son ubicuas y resistentes a la desecación. De hecho se pueden encontrar en abundancia en materiales biológicos en descomposición y en las deposiciones de algunos animales. La contaminación de heridas y de alimentos con las esporas es frecuente. Incluso heridas poco profundas como una pequeña abrasión, la perforación del lóbulo de una oreja, un tatuaje o hasta el pincharse con una aguja o con una espina de rosa pueden permitir la penetración de las esporas y crear condiciones favorables para la germinación de *Cl. tetani* (pero muy rara vez de *Cl. botulinum*) y para la producción de toxinas por parte de las bacterias neoformadas. A diferencia de muchas otras bacterias, *Cl. tetani* no causa lesiones visibles, ni invade los tejidos adyacentes. La infección, y con ella la intoxicación, puede tardar de dos a cuatro semanas en manifestarse, con los síntomas que ya hemos descrito antes.

Una forma de contaminación muy grave, pero frecuente, es la que se da en los países menos desarrollados al cortar el cordón umbilical con instrumental quirúrgico no esterilizado o con métodos que no garantizan la asepsia. En algunas regiones de Africa se aplican excrementos de animales con supuestas funciones cauterizantes, que no son sino una fuente riquísima de esporas. Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud, el subsiguiente *tetanus neonatorum* es responsable de la muerte de al menos 450.000 neonatos anualmente. Es, por tanto, la primera causa de muerte en todo el mundo durante el

GIAMPIETRO SCHIAVO, ORNELLA ROSSETTO y CESARE MONTECUCCO colaboran en el estudio del mecanismo de acción de las neurotoxinas bacterianas y su potencial empleo terapéutico, en el departamento de ciencias biomédicas de la Universidad de Padua.



3. EL MAPA MUESTRA la distribución del tétanos neonatal según los datos de la Organización Mundial de la Salud relativos a 1991. La incidencia del tétanos en el adulto no es muy diversa, aunque presenta valores altos incluso en Brasil.

primer año de vida. Según la misma fuente, el número de adultos muertos por tétanos alcanza los 350.000 por año, casi todos ellos concentrados en las zonas más pobres de la Tierra. De hecho, en el mundo desarrollado, los casos de tétanos se reducen a pocos centenares, gracias al recurso de la vacunación.

Dado que la enfermedad es causada por una toxina proteica, Gaston Ramon, del Instituto Pasteur en Garches, probó a tratar la toxina con formaldehído y obtuvo un toxoide tetánico, un derivado carente de toxicidad pero capaz de estimular el sistema inmunitario. Ramon demostró, tras inocular el toxoide tetánico en animales y en sí mismo, que inducía un estado de inmunidad activa. La eficacia de la vacuna quedó a la vista de todo el mundo cuando se supo que el número de bajas por tétanos durante la Segunda Guerra Mundial en las tropas británicas vacunadas fue de sólo 35 frente al gran número de casos verificados entre los soldados japoneses y alemanes, no vacunados.

La vacuna actual está formada por el toxoide absorbido sobre óxido o fosfato de aluminio o fosfato de calcio, con función coadyuvante de la respuesta inmunitaria. El toxoide tetánico se presenta normalmente asociado al toxoide diftérico y éste es el producto más difundido de la industria biotecnológica mundial, lo que se estima en alrededor de 500 millones de dosis por año. Según el protocolo de vacunación previsto por la legislación italiana, se obtiene un título sérico de anticuerpos antitoxina tetánica y antitoxina diftérica suficiente para proteger a la mayor parte de los vacunados al menos para unos cuarenta años. Los pocos casos de tétanos que todavía se registran en Italia suelen afectar a ancianos que no han sido vacunados o cuyo número de anticuerpos ha decrecido por debajo del margen mínimo de seguridad. En este último caso basta una simple inyección para alcanzar niveles con alta probabilidad de ser protectores.

El riesgo del desarrollo del tétanos en un individuo con heridas infectadas puede prevenirse de un modo pasivo, mediante inoculación de inmunoglobulinas procedentes de un sujeto inmune, aunque la inyección se le administre mucho después del trauma. Tiene ello la función de impedir la entrada de la toxina en las células nerviosas, pues una vez afectadas dichas células los anticuerpos antitoxina no tienen ya efecto. La virtual desaparición del tétanos en el mundo occidental es una de las grandes victorias de la medicina moderna, tanto de la investigación de laboratorio como de la organización sistemática de la medicina social.

Por desgracia, la situación en las regiones más retrasadas del globo es muy distinta. En parte por motivos económicos y por la dificultad de completar el ciclo de inyecciones previsto (al menos tres intervalos de 2-4 semanas y 6-12 meses), la mayoría de la población del Tercer Mundo no tiene un nivel de anticuerpos antitoxina tetánica suficiente como para garantizar una protección eficaz y, por consiguiente, las madres tampoco pueden proporcionar a sus hijos sus propios anticuerpos protectores. Para eliminar esta que se ha dado en llamar "enfermedad sin excusas", la Organización Mundial de la Salud ha puesto en funcionamiento un programa de vacunación masiva que ha podido cubrir más del cuarenta por ciento de la población mundial y que ha reducido la incidencia del tétanos neonatal a menos de la mitad.

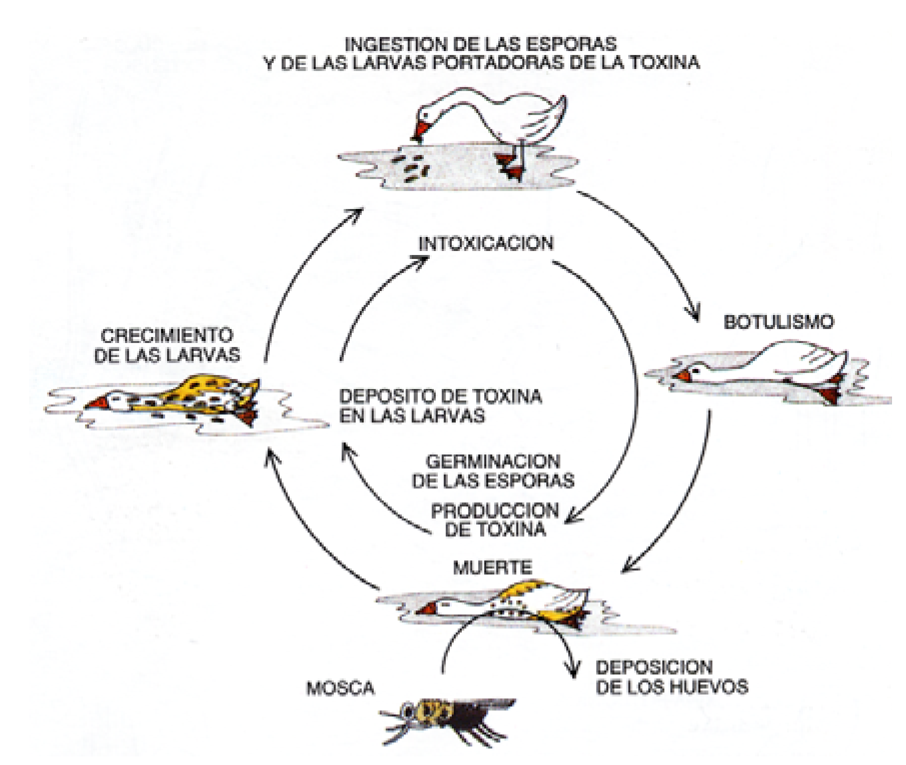
Los casos de botulismo son también muy raros en el mundo occidental, pero no gracias a la vacunación, sino a la distinta vía de penetración en el organismo que se observa en la toxina botulínica, como demuestra el hecho de que el botulismo por herida es muy poco frecuente. El *Cl. botulinum* prolifera bien en carnes y vegetales conservados en estado de anaerobiosis, incluso a temperaturas bajas. En estas condiciones y tras su ingesta, las cepas

que poseen un gen codificante para la toxina la producen y la liberan en un complejo proteico que la protege de la acidez y de las enzimas digestivas presentes en el estómago. No obstante, se destruye una gran parte de la toxina ingerida, lo que explica los efectos más limitados que se observan en la administración oral respecto a la inoculación intramuscular. El complejo botulínico que alcanza indemne el intestino se disocia por efecto del *p*H ligeramente básico del medio y libera la toxina que, si no es digerida por las enzimas pancreáticas, puede penetrar en el organismo a través de la pared intestinal. El botulismo prácticamente ha desaparecido de las regiones más desarrolladas por el perfeccionamiento en los procesos de preparación y conservación de los alimentos, pero subsiste como problema sanitario en las zonas más pobres.

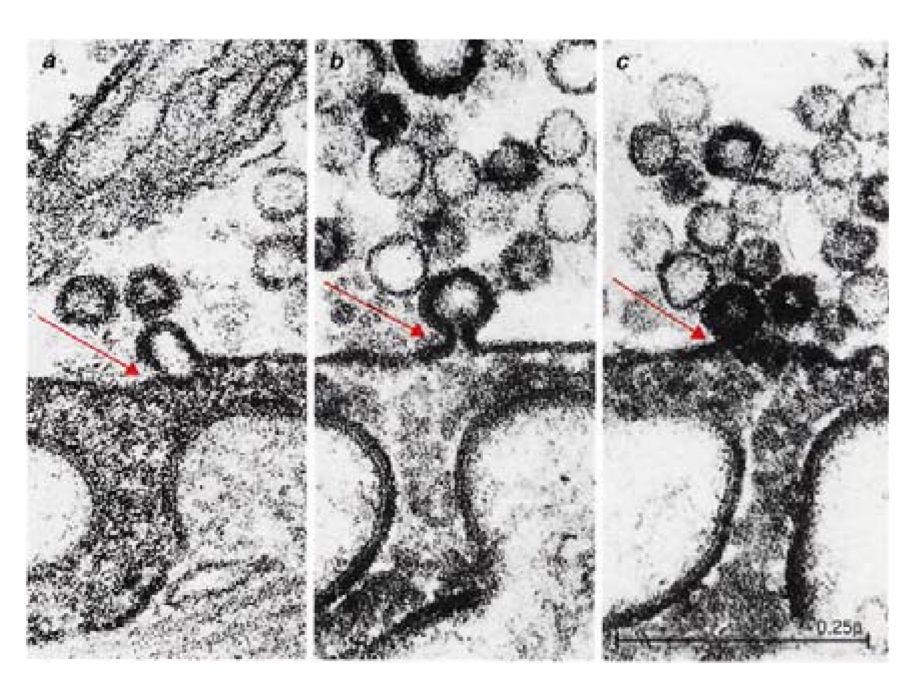
Una forma de botulismo particularmente artera es la que ataca a los niños en los primeros meses de vida. Por su carácter huidizo no se descubrió hasta 1976, mérito que cupo a Jackson Picket, Bruce Berg y colaboradores, de la Universidad de California en San Francisco, y Thaddeus Midura y Steve Arnon, del Departamento de Salud del estado de California en Berkeley.

En el botulismo infantil, las esporas de *Clostridium* toxinogénicas ingeridas en alimentos contaminados germinan en el tracto digestivo y producen la toxina. Ello es posible porque en los afectos aún no se ha desarrollado la habitual flora bacteriana intestinal que entre en competición con ella. El botulismo infantil no constituye, por tanto, una simple intoxicación, sino una infección seguida de una intoxicación.

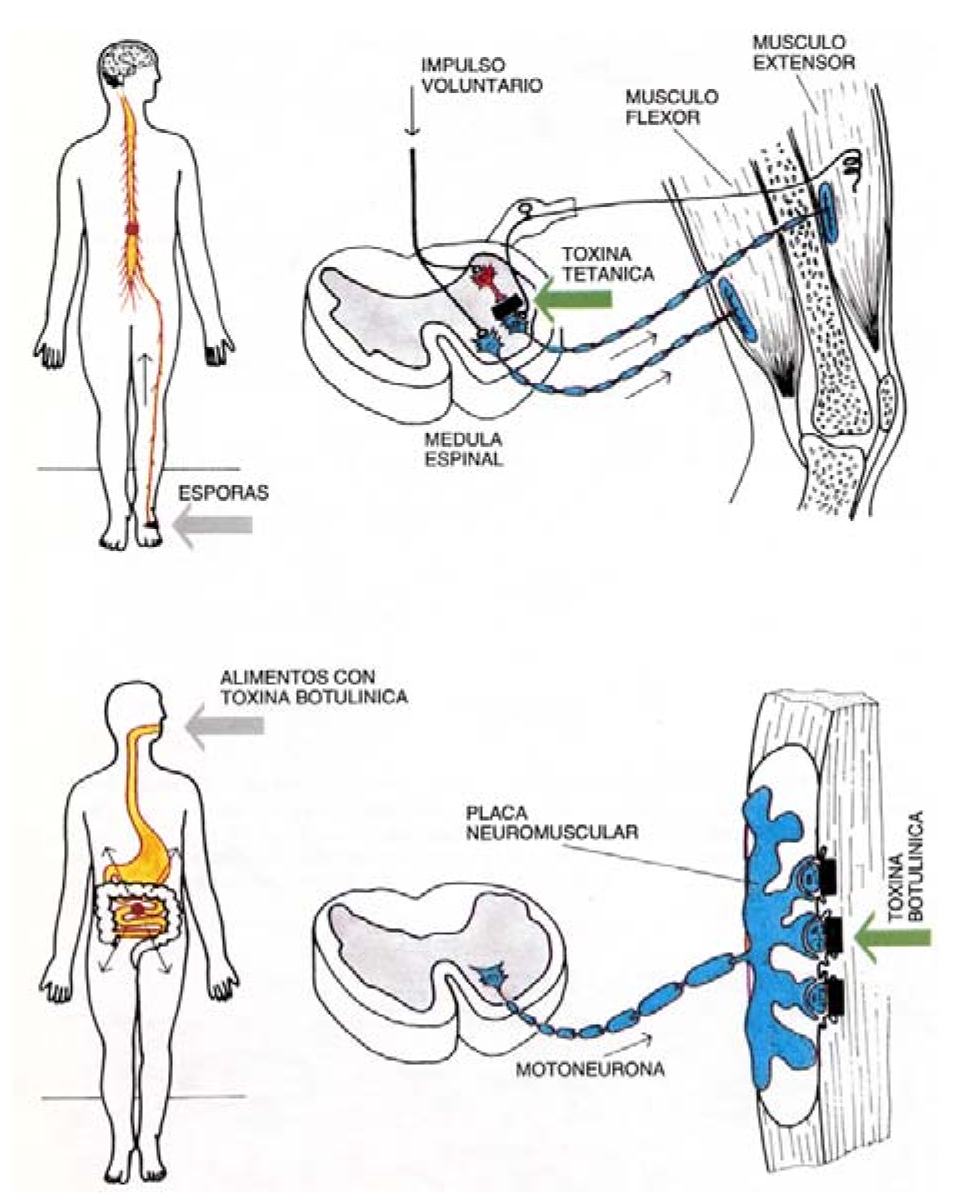
El botulismo, en mucha mayor medida que el tétanos, es una importantísima causa de muerte en los animales, tanto que puede tomar a veces proporciones de epidemia. El fenómeno es mucho más evidente en las aves. En la carne en putrefacción crecen tanto clostridios productores de toxina como larvas desarrolladas a partir de huevos depositados por insectos. Estas asimilan la toxina sin que les produzca alteraciones. Las larvas sirven de alimento a diversas especies de aves que, al ingerirlas, se intoxican y mueren de botulismo. Así se crea un nuevo terreno anaerobio ideal para el crecimiento de otros clostridios y la producción de más toxina, lo que generará un círculo vicioso mortal, en el que pierden



4. EN AVES la difusión del botulismo puede ser muy elevada. El animal que muere de botulismo constituye un terreno abonado para el crecimiento tanto de la bacteria productora de la toxina botulínica como para larvas de insectos resistentes a la neurotoxina, en cuyos tejidos se acumula. Numerosas aves pueden intoxicarse al alimentarse de estas larvas y morir, perpetuando un ciclo de características epidémicas.



5. MICROFOTOGRAFIAS que revelan tres uniones musculares de rana distintas, en su “zona activa”. Las preparaciones se estimularon eléctricamente durante un par de horas a 2 hertz y en presencia de peroxidasas de rábano, empleadas como marcador extracelular. Los espacios intersinápticos contienen depósitos densos de productos de reacción de las peroxidasas. Las imágenes muestran tres grados distintos de asociación entre las vesículas sinápticas, marcadas con peroxidasas, y la membrana presináptica. En *a*, la membrana de la vesícula se ha fusionado totalmente con la membrana presináptica; en *b*, un proceso mantiene la continuidad de ambas membranas; en *c*, la vesícula parece estar a punto de perder contacto con el axolema. (Imágenes tomadas de Bruno Ceccarelli y otros, *The Journal of Cell Biology*, 54, págs. 30-38, 1972, por cortesía de Flavia Valtorta, del Instituto de San Raffaele de Milán.)



6. MECANISMOS DE GENESIS de la parálisis espástica típica del tétanos (*arriba*) y de la parálisis fláccida, propia del botulismo (*abajo*). La toxina tetánica penetra en la unión neuromuscular y, en lugar de actuar de forma periférica, remonta el axón de la motoneurona desde el interior de vesículas. Posteriormente, se libera al espacio intersináptico en la médula espinal y penetra en las interneuronas inhibidoras, bloqueando la liberación de sus transmisores. Ello origina la inhibición del mecanismo de equilibrio de la contracción de músculos antagonistas controlado por dichas interneuronas, lo que produce parálisis espástica. Las neurotoxinas botulínicas también penetran en la motoneurona (en la unión neuromuscular) e inhiben *in situ* la liberación de acetilcolina; así se bloquea la transmisión del impulso nervioso al músculo.

la vida decenas, cientos de miles de animales a partir de un único episodio. Dado el escaso relieve epidemiológico del botulismo humano, no se considera necesaria la vacunación. Quienes la consideran imprescindible son los granjeros para prevenir los focos epidémicos que puedan surgir y que acarrean gravísimas pérdidas económicas.

El descubrimiento de que el tétanos y el botulismo están causados por toxinas proteicas ha abierto el camino a una intensa actividad de investigación que ha permitido conocer sus mecanismos de acción en el organismo, primero, y a nivel celular y molecular, después. En 1892 Alessandro Bruschettini, discípulo de Tizzoni en Bolonia, estableció que la toxina tetánica alcanza el sistema nervioso central mediante un desplazamiento retrógrado desde el axón de la motoneurona. Burgen, Dickens y Zatman, del hospital universitario Middlesex de Londres, demostraron en 1949 que las neurotoxinas botulínicas bloquean la liberación de acetilcolina en la unión neuromuscular. Poco después y gracias al trabajo de varios laboratorios, se pudo establecer que también la toxina tetánica se engarzaba en la unión neuromuscular. A diferencia de las toxinas botulínicas, la tetánica sale de la motoneurona y se libera al espacio intersináptico entre motoneurona e interneurona inhibidora, penetra en esta última y bloquea la liberación de neurotransmisores.

De esta manera se pueden explicar todos los síntomas clínicos de las dos enfermedades. En el botulismo observamos parálisis fláccida porque la toxina bloquea la transmisión del impulso nervioso en la unión neuromuscular. En el tétanos, en cambio, se da una parálisis espástica porque se inhibe el circuito nervioso espinal que asegura un adecuado equilibrio de la contracción de músculos opuestos, esencial para un movimiento armónico y controlado de las articulaciones.

El descubrimiento del bloqueo de la unión neuromuscular originado por las toxinas botulínicas ha promovido su uso creciente como fármacos en el tratamiento de patologías caracterizadas por hiperactividad de la unión neuromuscular. En un trabajo pionero publicado en 1973, Alan Scott y colaboradores, del Instituto Smith-Kettewell de Investigaciones Oftalmológicas de San Francisco, demostraron que se podían debilitar selectivamente músculos oculares de primates inoculando localmente cantidades mínimas de toxina botulínica. Este procedimiento se ha extendido a distintas patologías humanas, es reversible y tiene una eficacia limitada a algunos meses. La inoculación equivale funcionalmente, de hecho, a una denervación localizada y, al igual que ella, induce la formación de nuevas uniones neuromusculares adyacentes. La inoculación debe, pues, repetirse, si bien existe una complicación nada infrecuente que es la producción de anticuerpos antitoxina. Este problema puede evitarse con el empleo de serotipos distintos.

El norteamericano Instituto Nacional de la Salud ha declarado recientemente que el tratamiento con toxina botulínica es el método terapéutico de elección para una serie de distonías como blefarospasmo, estrabismo, tortícolis y disfonía. Las toxinas botulínicas se usan también cada vez más en el tratamiento de patologías de los grandes músculos dorsales y de los miembros. Es realmente sorprendente ver cómo, gracias a la investigación científica, en poco

tiempo se ha pasado del descubrimiento de las toxinas más potentes a su aplicación terapéutica.

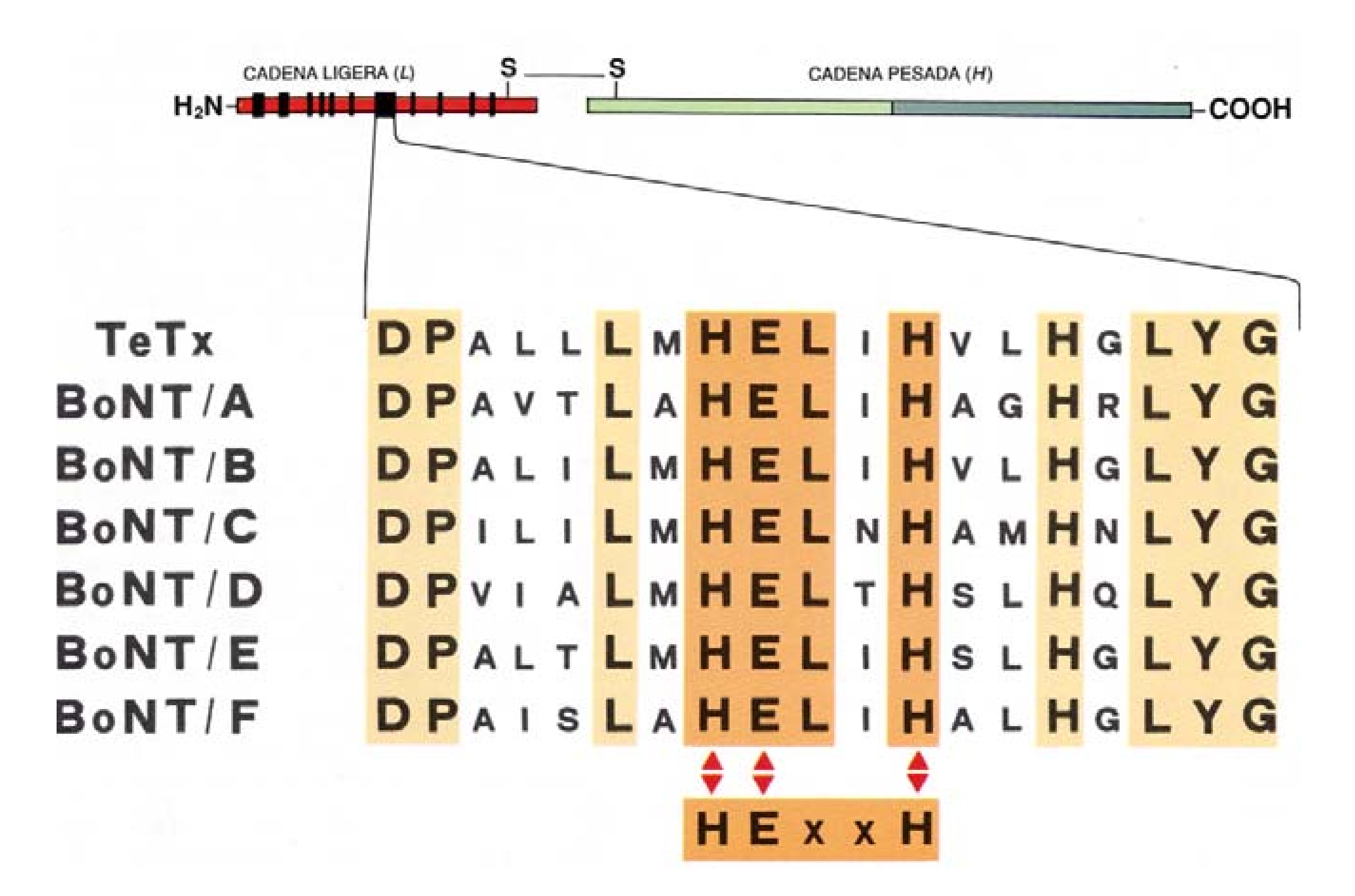
Aunque los síntomas clínicos del tétanos y del botulismo son opuestos, su modo de acción viene a coincidir, sin embargo: ambos bloquean la liberación de neurotransmisores por parte de las neuronas. Esta unificación en el mecanismo de acción celular ha estimulado ulteriores investigaciones con dos propósitos principales: descubrir el mecanismo de acción molecular de las neurotoxinas y conocer más sobre la neuroexocitosis, el mecanismo por el cual las neurohormonas o los neurotransmisores contenidos en las vesículas sinápticas se liberan al espacio intersináptico o a la unión neuromuscular.

Se ha descubierto que las toxinas se sintetizan en forma de precursor inactivo, una sola cadena polipeptídica de unos 150.000 dalton. Sucesivamente, proteasas bacterianas o tisulares la escinden en un único punto, transformándola en la forma bicatenaria: una cadena pesada (*H*, 100.000 dalton) y una cadena ligera (*L*, 50.000 dalton) unidas por un puente disulfuro intercatenario y por fuerzas no covalentes.

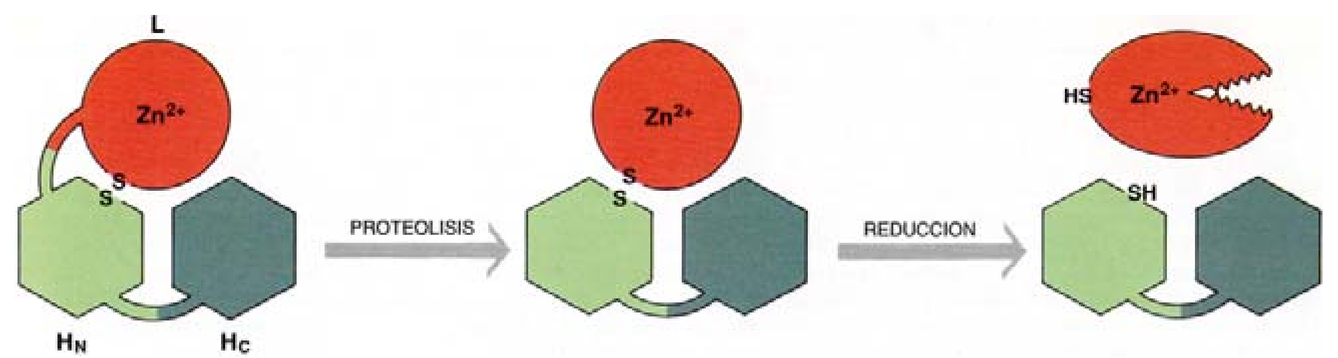
Los datos disponibles y su comparación con el proceso de intoxicación celular por toxina diftérica, estudiado en nuestro laboratorio por Emanuele Papini, sugieren cuatro fases para la intoxicación nerviosa: *a*) unión a células nerviosas; *b*) penetración celular en el interior de las vesículas; *c*) traslocación a través de la membrana vesicular, reducción del puente disulfuro y liberación de la cadena *L* al citoplasma; *d*) bloqueo de la neuroexocitosis. La cadena *H* es la principal responsable de la unión específica a células nerviosas, si bien todavía no se han podido encontrar las moléculas de la membrana plasmática implicadas en el proceso. Es éste un aspecto particularmente interesante porque se cree que en él puede residir la variable respuesta individual a la inoculación de toxina botulínica y constituir la base de las diferencias que aparecen entre las especies animales.

Hace poco demostramos que células de feocromocitoma de rata, cuya diferenciación se haya inducido en sentido neuronal mediante el factor de crecimiento nervioso, NFG, expresan en la superficie celular una proteína de unos 200.000 dalton que interacciona específicamente con la cadena *H* de la toxina tetánica. Otros datos indican asimismo que lípidos ácidos, como los gangliósidos, están involucrados en la fijación celular de cantidades de toxina extremadamente pequeñas, aunque suficientes para provocar la enfermedad.

La interacción con la membrana plasmática se continúa con la entrada de la toxina en la célula por un proceso de internalización en las vesículas aún desconocido. Elaine Neale, de Bethesda, ha proporcionado pruebas de que la toxina penetra en el citoplasma a partir de vesículas, cuyo interior acidifica una bomba protónica ATPásica. Se cree que la cadena *H* cambia de conformación al reducirse el *p*H, como ha sugerido Patrice Boquet, del Instituto Pasteur de París, y ayuda a la cadena *L* en su translocación citoplasmática. Serán necesarios nuevos conocimientos so-



7. ESTRUCTURA de las neurotoxinas del tétanos y del botulismo y del segmento homólogo (los aminoácidos están indicados en el código de una sola letra); hemos indicado en color naranja el motivo de unión de las zincendopeptidasas con el zinc, formado por histidina-ácido glutámico-xaa-xaa-histidina (HExxH, en el código de una sola letra de la ilustración).



8. EN EL PROCESO DE ACTIVACION de las neurotoxinas producidas por clostridios, éstas se sintetizan en forma monocatenaria (*izquierda*), pasan después por proteolisis a la forma bicatenaria (*esquema central*) y se activan, finalmente, en el interior de la célula nerviosa por reducción del único puente disulfuro intercatenario (*derecha*). Estas proteínas constan de tres dominios estructural y funcionalmente distintos: la cadena *L* (*en rojo*) cumple la función de bloquear el mecanismo de la neuroexocitosis; la porción carboxiterminal de la cadena pesada H_C es la principal responsable de la unión a la neurona, mientras que la porción aminoterminal de la cadena pesada H_N está relacionada con la translocación de *L* en el citoplasma, a través de la membrana celular.

bre tales aspectos antes de poder emplear estas toxinas como vectores de fármacos u otros agentes biológicos hasta el interior de la neurona.

Recientemente hemos aclarado cómo las cadenas *L* bloquean la liberación de neurotransmisores. Hemos demostrado que las cadenas ligeras de estas neurotoxinas son zincproteasas específicas de los componentes del mecanismo de exocitosis.

Partimos de un análisis comparativo de las secuencias aminoacídicas de las neurotoxinas producidas por clostridios, obtenidas por clonación y secuenciación de los genes correspondientes, gracias al trabajo realizado por varios laboratorios de todo el mundo, como los de Heiner Niemann, de la Universidad de Tübingen, Michel Popoff, del Instituto Pasteur de París, Nigel Minton, del Laboratorio de Sanidad Pública de Salisbury, y Neil Fairweather, de los Laboratorios Wellcome. En contra de lo esperado, la homología entre las distintas toxinas se limita a algunos segmentos no consecutivos y localizados preferentemente en la cadena *L*, la responsable del bloqueo de la neuroexocitosis. De todos ellos, el más conservado se encuentra en el centro de la cadena *L* y contiene la breve secuencia histidina-ácido glutámico-xaa-xaa-histidina, típica de las zincendopeptidasas y que media la fijación del zinc a la proteína.

Las endopeptidasas dependientes de zinc conforman una extensa familia de gran interés: zincproteasas específicas controlan la presión arterial (convierten angiotensina I y endotelina I en los correspondientes péptidos de acción vasoconstrictora) y están implicadas en la degradación de la encefalina, en la respuesta inflamatoria y en los subsiguientes procesos de reparación hística (proteasas de leucocitos), así como en procesos de invasión y metástasis de tumores malignos. Precisamente por su importancia y sus múltiples funciones, se conocen muchas características de estas proteasas, como la estructura tridimensional de cuatro de ellas, el mecanismo de escisión de la unión peptídica, donde el zinc desempeña un papel fundamental, y cientos de inhibidores.

Tras estas observaciones iniciales medimos el contenido de metales pesados de la toxina tetánica y de cinco serotipos de la toxina botulínica. Ello nos llevó al descubrimiento de que todas contienen un átomo de zinc por molécula de toxina unido a la cadena *L* por las dos histidinas del segmento central conservado, tal como se preveía por su homología con las zincproteasas.

Estos primeros resultados nos han espoleado a estudiar el auténtico papel del zinc de la toxina en el proceso de intoxicación de las neuronas. En colaboración con Bernard Poulain, del Laboratorio de neurobiología celular y molecular del CNRS en Gif-sur-Yvette, se desarrollaron una serie de experimentos de microinyección de toxinas, ampliamente modificadas, en pares de neuronas del ganglio bucal de *Aplysia californica*, un molusco marino, en los que se observó que el bloqueo de la neuroexocitosis por acción de la toxina tetánica depende estrechamente de la presencia del átomo de zinc. Además, hemos demostrado que los inhibidores de las zincendopeptidasas bloquean la actividad intracelular de la toxina. Ello proporciona una prueba indirecta, pero muy convincente, de que la toxicidad celular radica en una actividad de tipo proteásico.

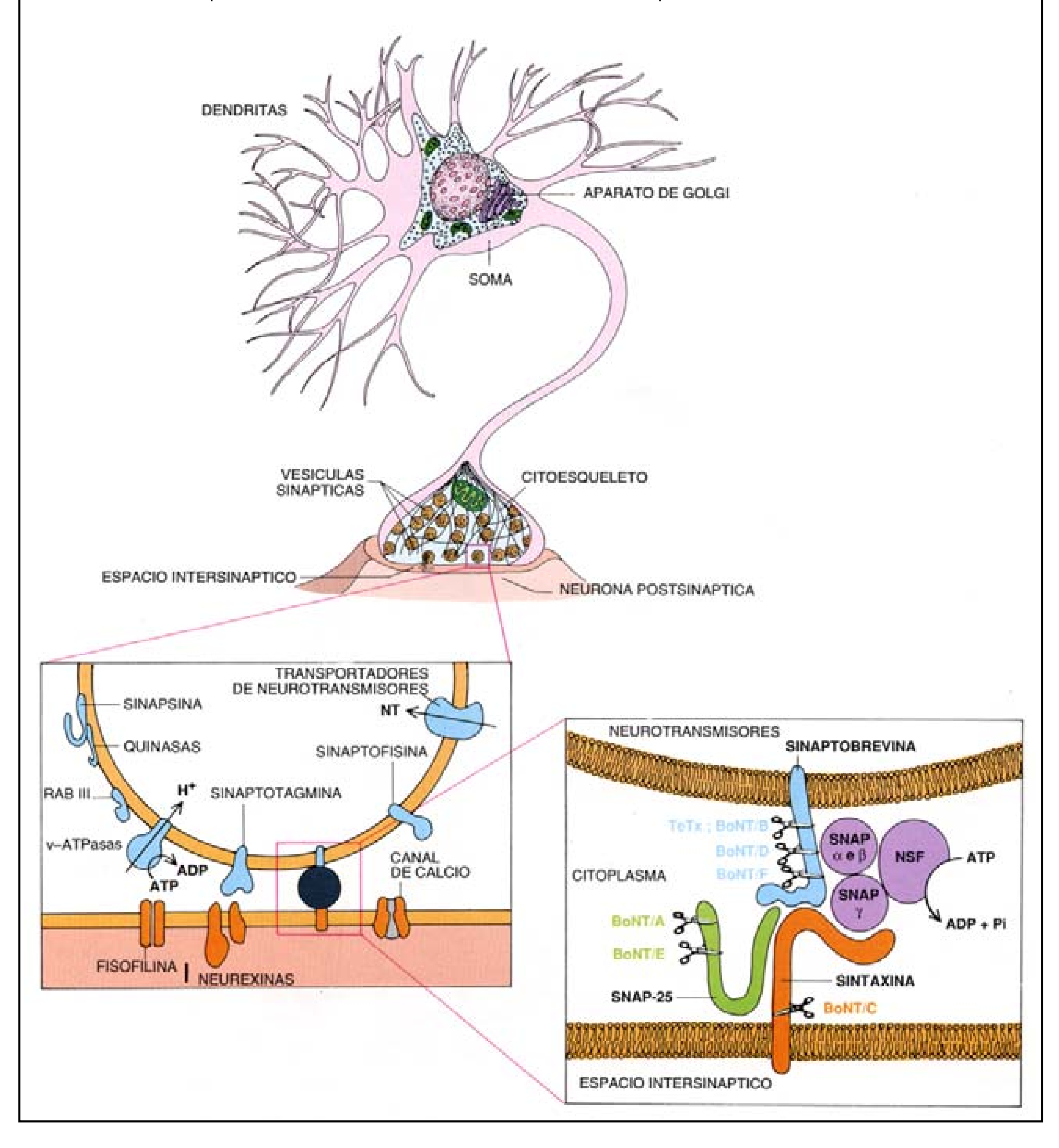
Una prueba directa de la actividad proteásica la obtuvimos al identificar la diana intracelular de estas neurotoxinas. En colaboración con Fabio Benfenati, del instituto de fisiología humana de la Universidad de Módena, descubrimos que la toxina tetánica y las botulínicas de los serotipos B, D y F cortan de modo específico una proteína de membrana de las vesículas sinápticas llamada sinaptobrevina (también VAMP).

La sinaptobrevina es una proteína de 13.000 dalton que, como sucede con frecuencia desde la introducción de las nuevas técnicas de genética molecular, fue descubierta no a partir del material proteico, sino a partir del ARN mensajero extraído del órgano eléctrico de torpedos por William Trimble y Richard Scheller, del Instituto Howard Hughes de la Universidad de Stanford. Se clonó después el gen que codifica dicha proteína en rata, mosquito, bovino y humano; su expresión en el tejido nervioso y en el neuroendocrino fue demostrada por Francesca Navone y Pietro De Camilli, de la Universidad de Milán, y por Reinhard Jahn, entonces en el Instituto Max-Planck de Munich.

Después de que en los años cincuenta se unificara el mecanismo celular, la identificación de la sinaptobrevina como sitio de acción intraneuronal común de las toxinas tetánica y botulínica de los serotipos B, D y F hace lo propio con el mecanismo de actuación molecular; ello permitirá el estudio y desarrollo de inhibidores específicos de ambas toxinas, constituidos en fármacos antitetánicos y antibotulínicos. Por ser una proteína de la membrana de las vesículas sinápticas, la diana común de estos bloqueantes de la liberación de neurotransmisores constituye, además, una prueba, tal vez definitiva, de

Proteínas diana de las neurotoxinas sintetizadas por clostridios

La sinaptobrevina (o VAMP) desempeña un papel fundamental en el anclaje de las vesículas sinápticas en las zonas activas de la membrana presináptica mediante el reconocimiento específico de SNAP-25 y sintaxina. Inmediatamente después del reconocimiento, se ensambla un complejo formado por proteínas citosólicas, como los factores de Rothman: una proteína con actividad ATPásica sensible a la N-etil-maleimida (NSF) y dos proteínas solubles, accesorias de NSF, la SNAP alfa o beta y la gamma. Por un mecanismo desconocido, la membrana vesicular se funde con la presináptica, lo que permite la liberación de neurotransmisores. Este proceso lo desencadena la entrada súbita, en apenas un centenar de microsegundos, de iones de calcio por los correspondientes canales vecinos y cuya apertura viene inducida por despolarización de la membrana plasmática. Como se ve en la ampliación de la derecha, las neurotoxinas del tétanos y del botulismo bloquean la neuroexocitosis mediante un corte único y específico de tres componentes esenciales en este proceso. La toxina tetánica y la botulínica de los serotipos B, D y F cortan la sinaptobrevina, unida a las vesículas que contienen los neurotransmisores. Los serotipos A y E y el serotipo C segmentan dos proteínas de la membrana presináptica, SNAP-25 y sintaxina, respectivamente.



la hipótesis vesicular de la liberación de los neurotransmisores.

Identificamos, asimismo, las dianas de los serotipos A y E de la toxina botulínica en SNAP-25 y la del C en sintaxina, simultáneamente a los grupos de Jahn y De Camilli, actualmente en la Universidad de Yale, y de Niemann, en Tübingen. Michael Wilson y colaboradores, del Instituto Scripps de Investigación de La Jolla, descubrieron en 1989 SNAP-25 gracias a técnicas de biología molecular. Está localizada en la superficie citosólica de la membrana presináptica y es imprescindible para el crecimiento del axón, tal como demostraron Stefano Catsicas y colaboradores, del Instituto Glaxo de Biología Molecular de Ginebra. En Stanford, en 1992, Mark Bennet y Richard Scheller identificaron y secuenciaron la sintaxina. Advirtieron su presencia en las zonas activas de la membrana presináptica, las áreas donde se fusionan las vesículas portadoras de neurotransmisores.

Hay que atribuir a James Rothman, Thomas Sollner y colaboradores, del Instituto Sloan-Kettering de Nueva York, la convergencia de la línea de investigación sobre la patología molecular del tétanos y del botulismo con el estudio genético de los procesos de secreción —realizados por los grupos de Randy Schekman, de la Universidad de California en Berkeley, y Peter Novick, de la Universidad de Yale— y con una línea de investigación de la bioquímica de la fusión de membranas celulares, estudiada en muchos laboratorios. El grupo de Rothman demostró que un complejo multiproteico interviene en el proceso mediante el cual vesículas celulares reconocen su lugar de destino, donde se fusionan las membranas respectivas. El complejo está formado por una serie de proteínas solubles identificadas por Rothman y colaboradores en los años ochenta: la proteína NSF, dotada de actividad ATPásica, y factores SNAP alfa y beta, muy semejantes entre sí, y gamma. También forman parte del complejo la sinaptobrevina, localizada en la superficie de las vesículas, y la sintaxina y la SNAP-25, situadas, a su vez, en la membrana diana con la que se fundirá la vesícula.

El que sean diana de neurotoxinas tres de las proteínas propuestas como integrantes del complejo multiproteico indica que forman su núcleo esencial y es, a la vez, la prueba más importante a favor del modelo de Rothman. Los datos se acumulan velozmente y por ello no debería sorprendernos que, con la colaboración de Luisa Gorza y Maurizio Vitadello, hayamos localizado esta proteína en muchos tejidos, no sólo en el nervioso, como se había visto antes.





9. UNA PACIENTE AFECTA de blefarospasmo tal como aparecía antes (*arriba*) y después del tratamiento con toxina botulínica efectuado por Emilio Campos, de la clínica oftalmológica de la Universidad de Módena.

Las neurotoxinas, auténticas tijeras moleculares de zinc, escinden la sinaptobrevina en un solo punto: las toxinas tetánica y botulínica del serotipo B cortan el enlace peptídico entre glutamina y fenilalanina, la del serotipo F separa glutamina y lisina, el serotipo D hidroliza el enlace peptídico entre lisina y leucina. La neurotoxina botulínica del serotipo C segmenta la sintaxina cerca de su punto de anclaje en la membrana. Por su parte, los serotipos A y E también fraccionan SNAP-25 en un único punto, distinto para cada una de las dos neurotoxinas. En los casos de la sinaptobrevina y de la sintaxina, la toxina separa de la membrana una parte importante de sus dominios citosólicos, lo que impide la unión de la vesícula con la membrana presináptica y la liberación de su contenido, neurotransmisores, al exterior. La gran importancia del proceso de neuroexocitosis en la fisiología animal explica que su bloqueo origine consecuencias tan severas como las descritas con anterioridad.

La neurotoxina botulínica del serotipo A separa un fragmento de tan sólo nueve aminoácidos, menos del cinco por ciento de la masa de SNAP-25, de la porción carboxiterminal de la molécula, lo que hace que la interpretación de su acción sea menos obvia. Por otra parte, ello indica que esa precisa porción de la molécula desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de la neuroexocitosis.

Estos descubrimientos demuestran la enorme potencia de estas toxinas, no sólo debida a su neuroespecificidad intrínseca. Así, una sola molécula de cadena *L* puede cortar, una detrás de otra, todas las moléculas de sinaptobrevina, SNAP-25 o sintaxina existentes en la terminación nerviosa. Es imposible pensar en un veneno que actúe a dosis inferiores a una molécula por célula. Estos fenómenos explican la persistencia de la enfermedad: es necesario inactivar primero la toxina, antes de que la célula pueda recuperar por síntesis *ex novo* su patrimonio de proteínas sinápticas, dañadas por la toxina.

La sinaptobrevina se produce en el sistema nervioso en dos isoformas (1 y 2) que sólo se diferencian de manera significativa en su porción aminoterminal y cuya función respectiva se desconoce. Es interesante destacar que tanto la neurotoxina tetánica como la botulínica del serotipo B cortan sólo la isoforma 2 en ratón y pollo. Gracias al trabajo de Trimble y Scheller, de Thomas Südhof, de la Universidad de Texas en Dallas, y de Tomaso Patarnello y Luca Bargelloni, de la Universidad de Padua, se ha demostrado que, en el ratón y en el pollo, la isoforma 1 se diferencia de la 2 en el sitio de proteolisis: se ha sustituido la glutamina por una valina. En humanos y topos, en cambio, ambas isoformas presentan la glutamina.

Basándonos en estos datos, hemos propuesto que los distintos grados de toxicidad, baja en ratón y pollo y alta en topo y humano, se deba, al menos en parte, a esta precisa mutación en el sitio de corte y no sólo a la presencia de receptores de alta afinidad por las toxinas en la unión neuromuscular.

Un aspecto interesante de nuestros estudios es el bloqueo de estas tijeras moleculares de zinc por péptidos que contienen la secuencia de corte y por inhibidores de zincproteasas. Uno de estos últimos, el captopril, inhibe específicamente la zincproteasa encargada de la conver-

sión de angiotensina I en angiotensina II, un potente vasoconstrictor, y se emplea desde hace tiempo como antihipertensivo. Estos agentes, eficaces *in vitro* o inyectados en célula, no lo son añadidos al líquido extracelular, pues no atraviesan la membrana plasmática. Si bien de escaso interés clínico, estos resultados son importantes porque permiten vislumbrar la posibilidad de desarrollar compuestos nuevos que combinen la acción inhibidora sobre las neurotoxinas del tétanos y del botulismo con la capacidad de atravesar las membranas celulares. Estos fármacos podrían ser de interés en el tratamiento de ambos síndromes. Neurólogos y oculistas los podrían utilizar para solucionar problemas por sobredosis de toxinas botulínicas.

Los resultados descritos han contribuido de manera esencial al esclarecimiento de la patogénesis molecular del tétanos y del botulismo, pero aún quedan muchos puntos oscuros. ¿Cuáles son los receptores de las distintas neurotoxinas? ¿Cuál es el mecanismo de penetración celular y de transporte retroaxónico de la toxina tetánica? Para contestar estas preguntas habrá que realizar nuevos descubrimientos en los mecanismos de la fisiología de la célula nerviosa. Mas aún queda por aclarar un último aspecto: la función de las toxinas en la ecología bacteriana de los clostridios.

En general, las bacterias producen toxinas con el fin de alterar la fisiología del huésped y crear, así, condiciones favorables para su multiplicación y su difusión en el ambiente. Si ésta es la función de las toxinas, tales alteraciones deben ser mínimas y no causar la muerte, un efecto contrario a lo deseado. Estas condiciones se satisfacen en todas las infecciones por bacterias productoras de toxinas: sólo una pequeña fracción porcentual de los enfermos mueren de difteria, cólera, tos ferina o disentería por *Shigella* o por cepas toxinogénicas de *Escherichia coli*.

Este no es el caso ni del tétanos ni del botulismo. A pesar de la ausencia total de datos sobre la ecología de los clostridios, podemos intentar dar una explicación, partiendo, naturalmente, del punto de vista de la bacteria anaerobia y no del de las víctimas potenciales de la infección. En general, los animales no presentan zonas de anaerobiosis tales que favorezcan el desarrollo de los clostridios, si exceptuamos algunas porciones del intestino de ciertas especies. La muerte del animal, en mucha mayor medida que una necrosis hística restringida, presenta unas condiciones ventajosas para un organismo anaerobio, pues permite su crecimiento en la carne en putrefacción. En pocas palabras, los clostridios transforman al involuntario huésped en un terreno anaerobio óptimo para su multiplicación. Cuanto mayor sea el animal, mayores posibilidades de desarrollo permitirá.

La "elección" de matar al huésped vendría forzada por presentar éste necesidades vitales aeorobias opuestas a las del clostridio, anaerobio, pues no puede reducir el oxígeno. Además, la transmisión por esporas precisa la intervención de un ser vivo para la transmisión de la especie. En algún punto del proceso evolutivo, la adquisición del gen que codifica las neurotoxinas ha permitido la transición del clostridio de saprófagos pasivos a bacterias activas, capaces de procurarse nuevas fuentes de alimentación.

Desde esta perspectiva, los primeros síntomas del tétanos y del botulismo cobran mayor significado. Alteraciones leves como la diplopía en el botulismo o la rigidez del cuello en el tétanos conducen, fuera del laboratorio o del hospital, a una muerte rápida por disminución de la capacidad de procurarse alimentos y de huir de los depredadores.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW DO TETANUS AND BOTULINUM TOXINS BIND TO NEURONAL MEMBRANES? C. Montecucco en *Trends in Biochemical Science*, n.º 11, páginas 314-318, 1986.

BOTULINUM NEUROTOXINS AND TETANUS TOXIN. Dirigido por L. L. Simpson. Academic Press, San Diego, 1989.

TETANUS AND BOTULINUM B NEUROTOXINS BLOCK NEUROTRANSMITTER RELEASE BY PROTEOLYTIC CLEAVAGE OF SYNAPTOBREVIN. G. Schiavo, F. Benfenati, B. Poulain, O. Rossetto, P. Polverino de Laureto, B. R. Dasgupta y C. Montecucco en *Nature*, vol. 359, págs. 832-835, 1992.

SNAPPY EXOCYTOTOXINS. W. B. Huttner en *Nature*, vol. 365, páginas 104-105, 1993.

NEUROTRANSMISSION AND SECRETION. T. Patarnello, L. Bargelloni, O. Rossetto, G. Schiavo y C. Montecucco en *Nature*, vol. 364, págs. 581-582, 1993.

Evolución de la corteza continental

Los continentes que se alzan sobre el nivel del mar deben su existencia a una larga historia de actividad vinculada con la tectónica de placas

S. Ross Taylor y Scott M. McLennan

La mayoría de la gente, salvo tal vez algunos habitantes de islas remotas, tiende de forma instintiva a considerar los continentes estructuras permanentes, características incluso de la Tierra. Es fácil olvidarse de que tales extensiones no son más que masas dispersas y aisladas en un planeta cubierto principalmente de agua. Pero desde el espacio se ve de inmediato, y con toda claridad, la imagen correcta de la Tierra: un planeta azul. Desde tal perspectiva resulta harto llamativo que en el transcurso de su larga historia la Tierra se las haya arreglado para mantener siempre emergida una pequeña porción de su superficie, posibilitando, entre otras cosas, la evolución del hombre en su suelo.

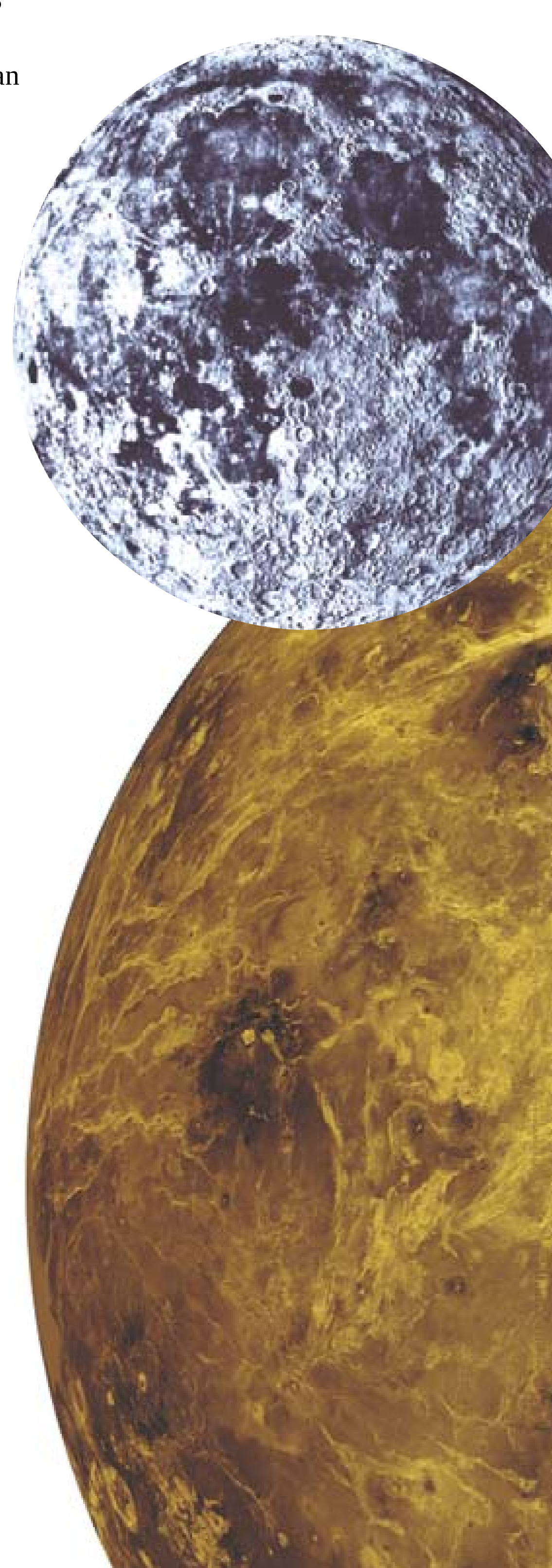
¿Es casual la persistencia de continentes alzados? ¿Cómo se formó la complicada corteza terrestre? ¿Ha estado siempre ahí, a modo de alcorza primitiva sobre una tarta planetaria, o ha evolucionado con el tiempo?

En torno a esas cuestiones y otras de parecido tenor surgieron debates en los que se enzarzaron los científicos durante muchas décadas. Hoy, la historia fascinante de la evolución de la superficie terrestre hasta su forma presente está resuelta en lo esencial. La interpretación actual muestra, lo que es digno de subrayarse, que las condiciones requeridas para que aparecieran nuestros continentes quizá no se repitan en el resto del sistema solar.

Fijémonos en Venus. Este y la Tierra, por su tamaño y distancia del Sol parecidos, suelen considerarse planetas gemelos. Por tanto, es natural preguntarse en qué coinciden sus cortezas respectivas. Las seculares observaciones telescópicas desde la Tierra nunca habían podido aportar ningún indicio de ello. Sin embargo, a principios de 1990, el radar orbitante de la sonda espacial *Magallanes* se adentró a través de las gruesas nubes que envuelven a Venus y nos mostró su superficie con una claridad sorprendente. Con las imágenes minuciosas de la morfología del relieve los planetólogos pueden elaborar hipótesis sobre el empedrado externo de Venus.

La costra del planeta Venus parece hecha de rocas de composición basáltica, muy semejantes a las rocas oscuras de grano fino que ocupan las cuencas oceánicas de la Tierra.





1. LA CORTEZA TERRESTRE consta predominantemente de rocas basálticas que ocupan el fondo de las cuencas oceánicas. Las rocas graníticas constituyen mesetas continentales elevadas. Venus, con parejo tamaño que la Tierra, ofrece, a tenor de las imágenes de radar, una corteza compuesta casi exclusivamente de basalto. Sólo una minúscula fracción de la superficie de ese planeta presenta altiplanos en forma de tarta (*detalle arriba*) que, como los continentes de la Tierra, podrían ser de material granítico. La corteza de la luna terrestre está cubierta, en buena parte, por tierras altas de tonos claros que aparecieron cuando nuestro satélite se enfrió por vez primera a partir de un estado fundido; más tarde, las erupciones volcánicas crearon los mares de basalto.

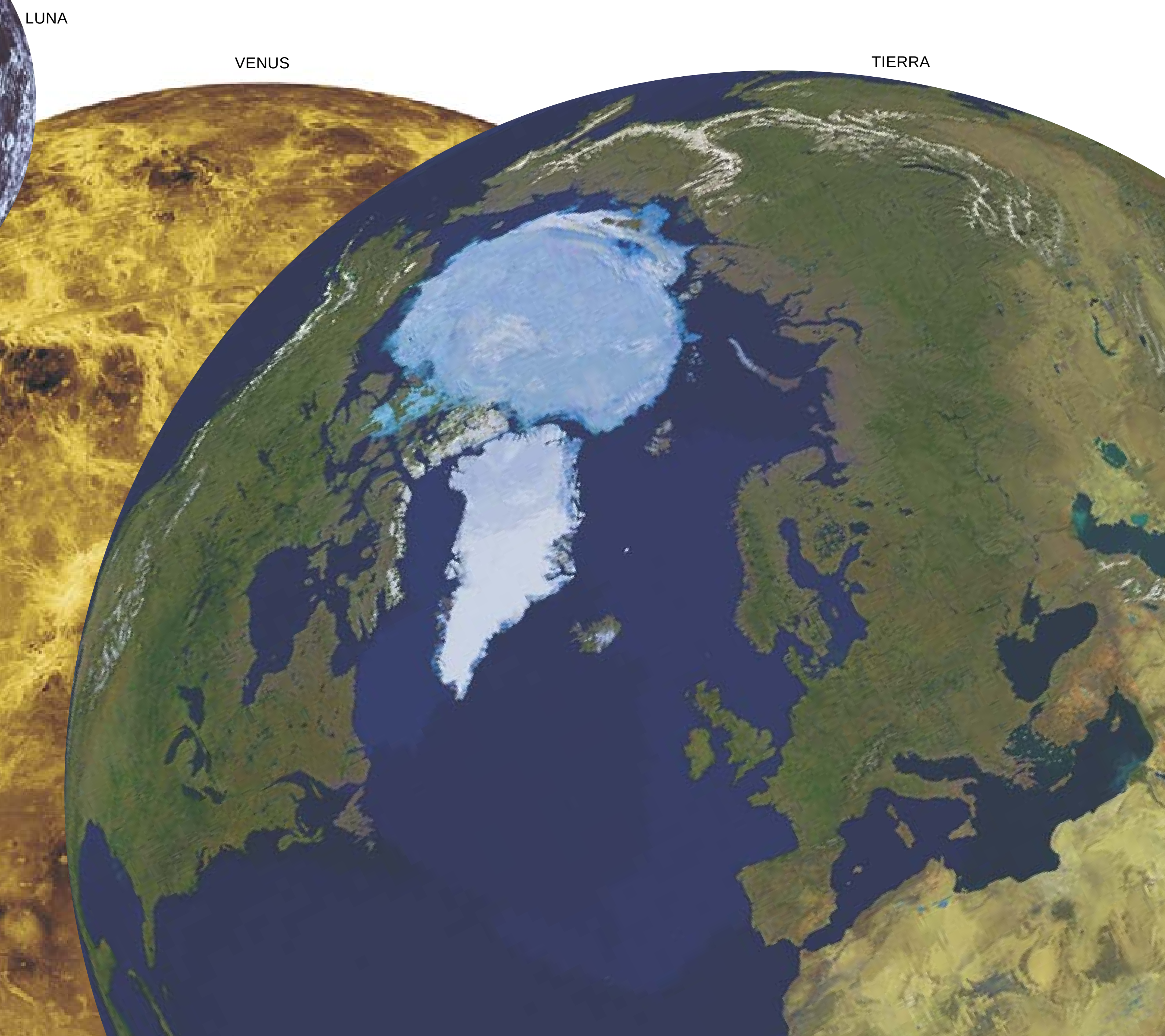
Pero no se ha logrado comprobar, en la cartografía realizada por la sonda *Magallanes*, que hubiera vastas extensiones equiparables a la corteza continental terrestre.

Las regiones elevadas de Terra Aphrodita y Terra Ishtar parecen igualmente restos de lavas basálticas, aunque deformadas. Se han descubierto en Venus unos cerros cupuliformes menores; esas estructuras podrían indicar la existencia en determinados puntos de una composición substancialmente diferente del substrato rocoso. Pero también cabría que estos accidentes en forma de tarta fueran sólo más basalto.

Tras analizar el acopio de datos obtenidos por el radar de la sonda, se ha llegado a la conclusión de que la tectónica de placas (es decir la creación, el movimiento y la destrucción continuos de partes de la superficie del planeta) no parece intervenir en Venus. Los sistemas terrestres de extensas dorsales mesoceánicas o de grandes fosas no hallan allí su obvio correlativo. En consecuencia, no es probable que la corteza de Venus se recicle regularmente regresando al manto del planeta. Ni tampoco parece imperiosa la necesidad de dejar sitio para corteza nueva: la cantidad de lava que suele hacer erupción en Venus viene a ser el equivalente de lo que arroja un solo volcán hawayano, el Kilauea, es decir, un mero goteo en el conjunto del planeta.

El conjunto de esos descubrimientos relativos a Venus y los obtenidos en exploraciones similares de otros cuerpos del sistema solar revelan que las cortezas planetarias admiten una división en tres tipos fundamentales: corteza primaria, secundaria y terciaria.

La corteza primaria remonta su origen a los inicios del sistema solar. Emergió después de que grandes fragmentos de material primitivo se estrellaran contra un planeta en desarrollo, liberando energía suficiente para provocar la fusión del protoplaneta original. Cuando la roca fundida empezó a enfriarse, los cristales de unos tipos de minerales se solidificaron antes que otros, y se separaron del cuerpo de magma. A través de ese proceso surgieron, probablemente, las blancas altiplanicies de la Luna: sobre un primitivo "océano" lunar de basalto fundido flotaron granos poco densos de feldespato. La corteza de



muchos satélites de los gigantescos planetas externos, compuesta de mezclas de roca y hielos de agua, metano y amoníaco, pudieron también haberse generado por fusión catastrófica durante la fase inicial de acreción.

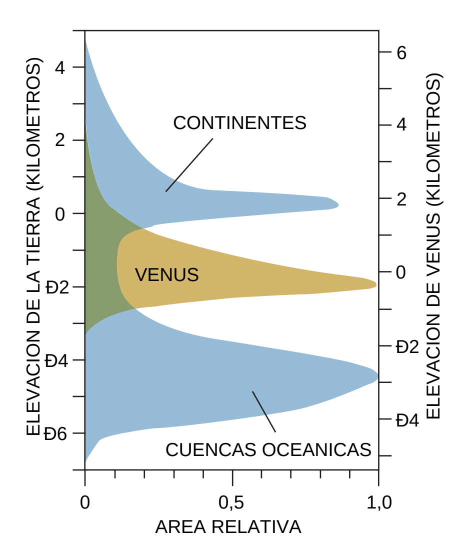
A diferencia de la primaria, producto resultante de episodios de fusión súbita a gran escala, la corteza secundaria se forma en virtud de la acumulación gradual, en un cuerpo planetario, de calor procedente de la desintegración de elementos radiactivos. Este calentamiento lento genera la fusión de una pequeña fracción del interior rocoso del planeta y suele provocar erupción de lavas basálticas.

Las superficies de Marte y de Venus y los suelos oceánicos de la Tierra están cubiertos de corteza secundaria creada por ese proceso. Los llamados "mares" lunares por los astrónomos de la antigüedad nacieron también de lavas basálticas originadas en el interior profundo de la Luna. Al calor radiactivo —o tal vez resultante de la flexión inducida por fuerzas de marea— deben también su corteza secundaria ciertas lunas heladas del sistema solar exterior.

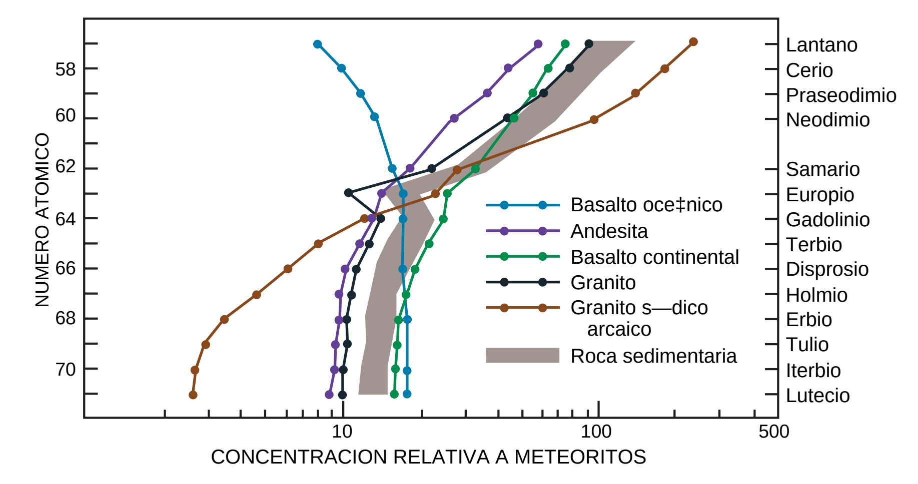
Muy distinta de los dos tipos precedentes, más o menos habituales, la corteza terciaria podría requerir para instaurarse que las capas superficiales regresaran al manto subyacente de un planeta que mantenga actividad geológica. A modo de destilación continua, el volcanismo puede entonces permitir la producción de un magma altamente diferenciado cuya composición difiera en mucho del basalto; fuera más parecida a la del granito, roca ígnea de tonos claros. El reciclaje necesario para generar magma granítico sólo puede darse en un planeta donde opere la tectónica de placas. Puesto que tal composición es rara en el sistema solar, la formación de corteza continental en la Tierra tal vez constituya la única demostración de tal reciclaje.

Pese a la escasez de ejemplos que nos han llegado de cada una de las tres categorías, es plausible una generalización sobre la génesis de las superficies planetarias: nos referimos a la distinta tasa o velocidad de formación de los diversos tipos de corteza.

La Luna forjó su blanca corteza primaria, rica en feldespatos y que abarca un 12 por ciento del volumen del satélite, en sólo unos millones de años. Las cortezas secundarias proceden con mayor parsimonia. Por seguir con el mismo ejemplo, los mares basálticos de la Luna (corteza secundaria), que alcanzan escasos centenares de metros de grosor y constituyen un 0,1 por ciento del volumen total, emplearon más de mil millones de años en formarse. Otro ejemplo de corteza secundaria: las cuencas oceánicas basálticas de nuestro planeta (que comprenden un 0,1 por ciento de la masa terrestre) han tardado 200 millones de años en constituirse. Se trata, evidentemente, de un paso muy lento. No tanto, sin embargo, como el ritmo de creación de corteza terciaria. Para fabricar la suya —los continentes— la Tierra ha invertido varios miles de millones de años. Y con todo, su masa no supone más que el 0,5 por ciento de la que posee el planeta.



3. LAS ALTITUDES DE LA TIERRA (*azul*) muestran una distribución diferente de las observadas en Venus (*dorado*). La mayoría de los lugares de la Tierra se encuadran en dos niveles dominantes. En cambio, una sola altura caracteriza la mayor parte de la superficie de Venus. (La altura de Venus se expresa con respecto al radio medio del planeta.)



2. LOS PATRONES DE ABUNDANCIA DE ELEMENTOS de las tierras raras constituyen indicadores químicos característicos de los tipos de roca que han formado la corteza terrestre. Las rocas ígneas (solidificadas a partir de un magma) pueden presentar rúbricas sumamente variables de elementos de tierras raras (*líneas con puntos*); en cambio, el patrón de la mayoría de las rocas sedimentarias cae en una gama estrecha (*banda gris*). Tal uniformidad se debe a que los sedimentos registran bien la composición media de la corteza continental superior.

Las rocas graníticas están enriquecidas en muchos elementos muy difíciles de hallar en otros materiales, fenómeno que confiere a la corteza continental una importancia que desborda su exigua masa. Pero los geólogos no han logrado calcular por observación directa la composición media de la corteza, punto de partida obligado para cualquier investigación de su origen y evolución. La cuestión podría abordarse a través de la compilación de las descripciones ya realizadas de rocas que afloran en la superficie. Sin embargo, ni siquiera podría bastar semejante cúmulo de información. Por otro lado, un programa de prospección a gran escala que alcanzara profundidades corticales suficientes para un muestreo significativo exigiría un desarrollo mayor de las técnicas modernas de perforación y en cualquier caso resultaría prohibitivamente caro.

Por suerte se cuenta con una solución más sencilla. La naturaleza ya ha realizado un muestreo generalizado a través de la erosión y deposición de sedimentos. Los barros de las profundidades, convertidos ahora en

rocas duras, dan una composición media sorprendentemente buena de la corteza continental que aflora. Claro que a estas muestras les faltan los elementos solubles en agua, como el sodio y el calcio. Entre los elementos insolubles transferidos de la corteza a los sedimentos sin distorsión en sus abundancias relativas se cuentan los 14 elementos de las tierras raras (REE). Estos identificadores elementales tienen una utilidad sin parangón para descifrar la composición cortical. Ello es debido a que, como sus átomos no acaban de acoplarse en la estructura cristalina de la mayoría de los minerales comunes, tienden a concentrarse en los productos graníticos, de formación más reciente, de un magma que se enfría; granito que da cuenta de la mayor parte de la corteza continental.

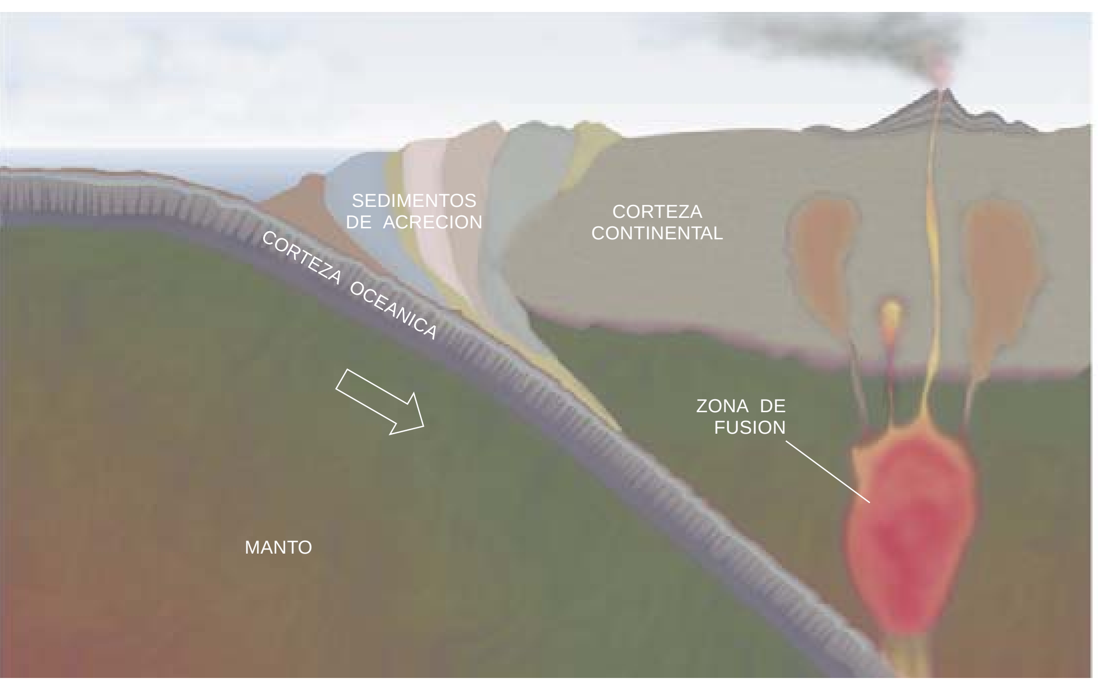
Los patrones de REE observados en sedimentos diversos son muy parecidos. Por ello los geoquímicos suponen que la meteorización, la erosión y la sedimentación deben mezclar rocas ígneas fuente muy diferentes, y hacerlo con la eficacia suficiente para crear una muestra representativa de la corteza continental. Todos los miembros del grupo REE establecen una rúbrica de la composición cortical superior y preservan, en forma de patrones de concentración de elementos, un registro de los acontecimientos ígneos que pueden haber influido en la constitución de la corteza.

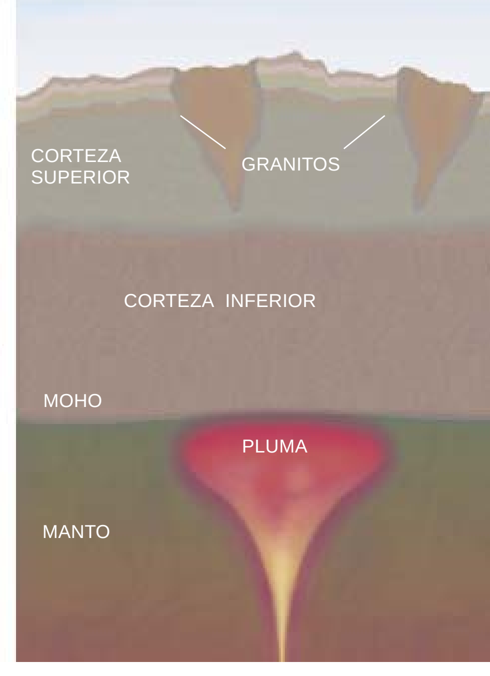
Apoyándose en estos trazadores geoquímicos, los geólogos han determinado, por ejemplo, que la composición de la parte alta de la corteza continental se aproxima a la de la granodiorita, una roca ígnea ordinaria que consiste principalmente en cuarzo y feldespato, ambos de tono claro, salpicados de diversos minerales oscuros. A unos 10 o 15 kilómetros corteza adentro, la roca dominante tiene probablemente una composición más basáltica. Se discute sobre la naturaleza exacta de este material; los geólogos suelen poner a prueba sus ideas midiendo el calor producido en la corteza por el potasio, uranio y torio, importantes elementos radiactivos. Parece razonable pensar que al menos ciertas partes de esta región enigmática e inaccesible sea de basalto que esté aprisionado y taponado bajo los continentes, de densidad menor.

Esta propiedad física de la roca granítica —su baja densidad— explica por qué la mayoría de los continentes no están sumergidos. La corteza continental se alza en promedio unos 125 metros por encima del nivel del mar y un 15 por ciento de la superficie continental se eleva por encima de los dos kilómetros. Estas grandes alturas contrastan notablemente con las profundidades de los suelos oceánicos, cuya profundidad media bajo el nivel del mar ronda los 4 kilómetros —consecuencia directa de su empedrado basáltico apenas revestido de sedimento.

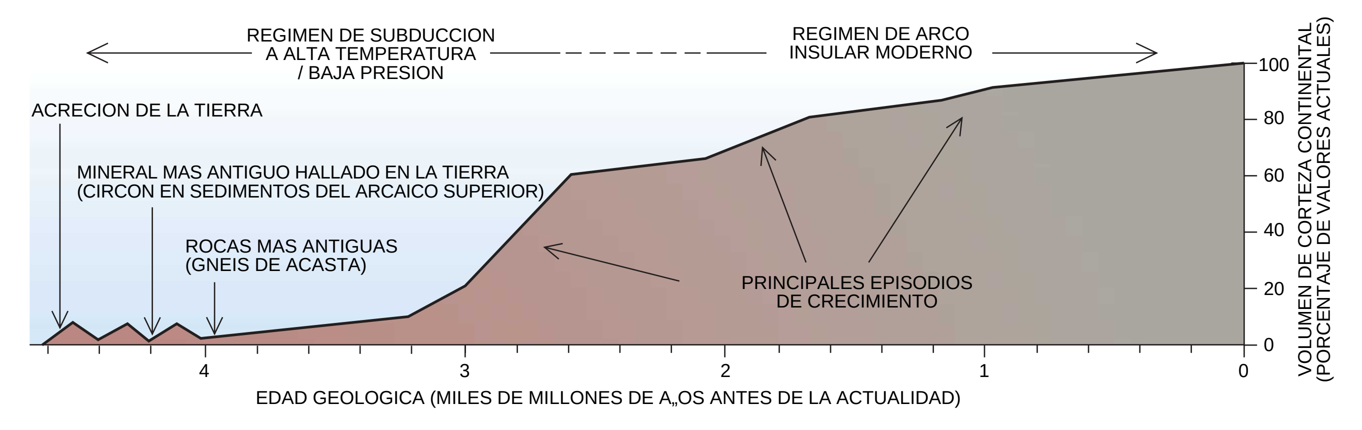
En la base de la corteza se detecta la discontinuidad llamada de Mohorovicic (que los geólogos abrevian en “Moho”). Esta superficie profunda señala un cambio radical de composición: el paso a una roca extremadamente densa rica en el mineral olivino que subyace por doquier, bajo los continentes y bajo los océanos. Los estudios geofísicos basados en ondas sísmicas han localizado el Moho en todo el mundo; además, han sugerido

S. ROSS TAYLOR y SCOTT M. McLENNAN han trabajado juntos desde 1977 en el estudio de la evolución de la corteza terrestre. Taylor, que ha investigado además en selenografía y planetología, enseña física en la Universidad Nacional Australiana. McLennan, docente en el departamento de ciencias de la Tierra y el espacio en la Universidad Estatal de Nueva York en Stony Brook, es especialista en geoquímica.





4. LA ACTIVIDAD DE TECTONICA DE PLACAS transporta corteza oceánica hacia el interior de la Tierra (*izquierda*), enterrando sedimentos húmedos junto con la laja descendente. A unos 80 kilómetros de profundidad, las altas temperaturas reinantes extraen agua de los sedimentos y promueven la fusión de la roca suprayacente. El magma que se genera a lo largo de este proceso asciende luego por flotación y forma nuevo material continental en la vecindad de la superficie. A medida que va madurando la corteza (*derecha*), el calor que procede de la desintegración radiactiva (o de plumas de magma basáltico ascendentes) puede desencadenar fusión a niveles más someros. Tales episodios crean una capa superior constituida principalmente por granito.

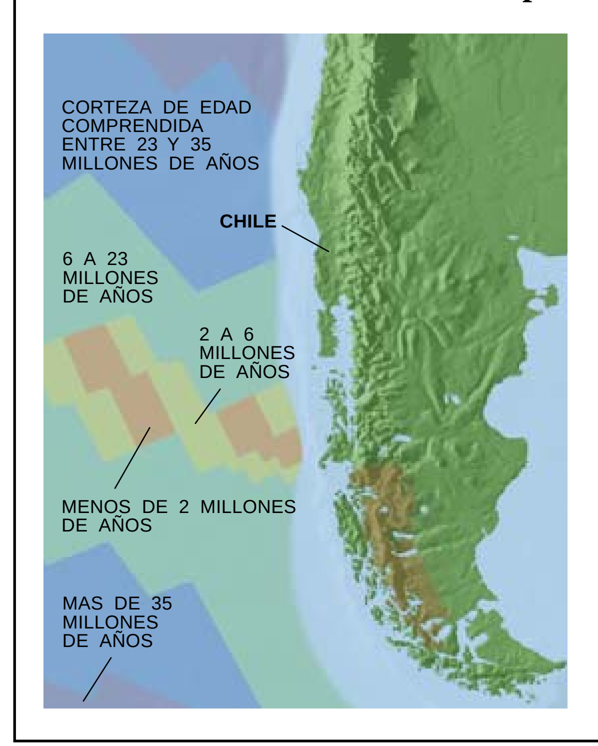


5. EL CRECIMIENTO CORTICAL se ha producido de manera episódica durante miles de millones de años. Una racha de crecimiento importante duró desde hace unos 3000 hasta hace unos 2500 millones de años, intervalo que coincide con la transición entre el eón Arcaico y el eón Proterozoico. La fusión generalizada de entonces formó los cuerpos de granito que hoy constituyen gran parte de la capa superior de la corteza continental.

que el manto situado bajo los continentes podría estar permanentemente adherido a su techo. Estas “quillas” subcorticales, más o menos frías, alcanzan una potencia de hasta 400 kilómetros y, por lo que parece, se trasladan con los continentes durante sus movimientos por tectónica de placas. Sirven de apoyo a esta interpretación los resultados de análisis de minúsculas inclusiones minerales halladas en diamantes, minerales que se consideran generados a gran profundidad en esa región subcortical. Las mediciones revelan que la edad de los diamantes tal vez supere los tres mil millones de años, lo que demuestra la antigüedad de las profundas raíces continentales.

Vale la pena caer en la cuenta de que, todavía no hace 40 años, carecíamos de pruebas que indicaran alguna diferencia sustancial entre el lecho rocoso del océano y las rocas emergidas. Se creía simplemente que el fondo de los océanos lo constituían continentes hundidos. Tal percepción era consecuencia bastante natural del concepto según el cual la corteza continental era un accidente que envolvía toda la Tierra, nacido a modo de espuma de un planeta inicialmente fundido. Si bien hoy se admite una fusión de la Tierra en sus orígenes, nunca debió de existir la corteza granítica primaria que se imaginaba hace unas décadas.

Instantánea del pasado



Los granitos ricos en sodio son característicos del eón Arcaico. Durante esa época, el motor de la tectónica de placas operaba con mayor celeridad que hoy. Estos granitos tonalita-trondjemita-granodiorita (TTG) se forman únicamente si entra en el manto corteza oceánica joven (y, por tanto, caliente), desencadenando la fusión a niveles más someros. Tales condiciones se dan hoy a lo largo de la costa austral de Chile, donde se ha subducido corteza oceánica relativamente nueva bajo la placa Sudamericana. La región que contiene granitos TTG aparece en marrón.

¿Cómo se formaron en la Tierra dos cortezas tan dispares, la continental y la oceánica? Para responder a esa cuestión hemos de remontarnos a los comienzos del sistema solar. De la región, de la nebulosa solar primitiva, ocupada por la órbita de la Tierra se barrió casi todo el gas y sólo se acumularon residuos de entidad suficiente como para resistir la intensa actividad inicial del Sol. Estos objetos debieron a su vez desarrollarse mediante acreción, antes de congregarse y constituir nuestro planeta, proceso que requirió entre 50 y 100 millones de años.

En las postrimerías de ese estadio de formación, un planetesimal enorme, tal vez del tamaño de Marte, se estrelló contra la Tierra, ya casi plenamente formada. El manto rocoso del cuerpo impactante rebotó y quedó girando en órbita, convirtiéndose en la Luna, mientras que el núcleo metálico de ese objeto cayó en la Tierra [*véase* “El legado científico del proyecto Apolo”, por G. Jeffrey Taylor; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1994]. Como es de presumir, el acontecimiento resultó catastrófico: fundió por completo nuestro planeta niño. Con el subsiguiente enfriamiento y solidificación, iríase generando probablemente una corteza basáltica inicial.

La superficie terrestre de este estadio debió de parecerse a la actual de Venus. Pero de esa corteza primaria no ha quedado nada. No se sabe si se hundió en el manto, como lo hace hoy, o si se amontonó en masas localizadas hasta que su grosor

la transformó en una roca más pesada y se hundió. En cualquier caso, no hay indicios de corteza granítica substancial en esta fase originaria. De haber persistido tal corteza, deberían habernos llegado pruebas reveladoras de su existencia a través de granos dispersos de circón, el mineral que se forma en el interior del granito y opone enorme resistencia a la erosión. Se han hallado unos cuantos circones de esta edad (los ejemplos más antiguos corresponden a rocas sedimentarias australianas de hace 4200 millones de años), pero estos granos son demasiado escasos.

Mayor información sobre la corteza inicial la aportan las rocas más antiguas que han permanecido intactas. Se formaron a gran profundidad en la corteza hace casi 4000 millones de años y hoy afloran en el noroeste del Canadá: es el gneis de Acasta. Se han descubierto ejemplos un poco más jóvenes de corteza antigua en diversos lugares del mundo, si bien la mejor estudiada de estas viejas formaciones se halla en Groenlandia occidental. La abundancia allí de roca sedimentaria da fe de la presencia de cursos de agua y de la existencia de lo que probablemente fueron auténticos océanos durante esa remota época. Pero estas rocas viejísimas datan de 400 o 500 millones de años después de la fase de acreción de la Tierra, un hiato en el registro geológico que se caracterizó, sin duda, por impactos masivos que desorganizaron gravemente la corteza terrestre inicial.



6. VOLCANES como este que hace erupción en la península de Kamchatka indican el lugar donde se forma material continental nuevo sobre corteza oceánica que se subduce. Con el tiempo, los litosferoclastos, terrenos geológicamente activos, se desarrollarán en corteza continental estable.

El registro conservado en rocas sedimentarias enseña a los geólogos que la formación de corteza continental ha sido un proceso continuo en la larga historia de la Tierra. Pero la creación de corteza no ha tenido siempre el mismo carácter. Por ejemplo, en el límite entre los eones Arcaico y Proterozoico, hace 2500 millones de años, se detecta un cambio evidente en el registro rocoso. La corteza superior antes de ese cambio constaba de componentes menos evolucionados, una mezcla de basalto y granitos ricos en sodio: el llamado cortejo TTG, de tonalita-trondjemita-granodiorita. Se trataba de una composición que difería bastante de la que presenta la corteza superior actual, en la que dominan los granitos ricos en potasio.

El cambio drástico operado en la composición cortical hace 2500 millones de años parece vinculado a las deformaciones debidas a la tectónica de placas terrestre. Con anterioridad a ese momento, la corteza oceánica se reciclaba rápidamente, pues los niveles de radiactividad eran muy altos y el intenso calentamiento tendía a agitar un motor muy rápido de tectónica de placas. Durante el Arcaico debió de haber más de 100 placas distintas; hoy, sólo una docena. A diferencia de la corteza oceánica actual —que recorre una larga distancia y se enfría considerablemente antes de retornar al manto—, la corteza oceánica de época remota duraba muy poco. Por tanto, se encontraba todavía relativamente caliente cuando regresaba al manto y empezaba a fundirse a profundidades menores que las típicas de la fusión actual. Tal diferencia explica la formación de las rocas ígneas ricas en sodio del cortejo TTG; hoy la formación de esas rocas está restringida a los contados lugares donde la corteza oceánica que se subduce está caliente porque es joven.

La tendencia inicial del magma a adquirir una composición TTG explica por qué la corteza creció constituida en mezcla de basalto y tonalita durante el eón Arcaico. En esa época emergió una gran proporción de la corteza continental —por lo menos el 50 por ciento, si no el 70 por ciento— con un episodio principal de desarrollo entre 3000 y 2500 millones de años atrás. Desde entonces, la altura relativa de las cuencas oceánicas y las mesetas continentales se ha mantenido bastante estable. Al iniciarse el eón Proterozoico, hace 2500 millones de años, la corteza había ya adquirido gran parte de su constitución actual y empezó el reciclaje moderno por tectónica de placas.

La corteza oceánica se forma normalmente por erupción de lava basáltica a lo largo de una red planetaria de dorsales mesoceánicas. Mediante este proceso, se producen cada año más de 18 kilómetros cúbicos de roca. La laja de corteza recién formada junto con el subyacente techo del manto constituyen la litosfera rígida. La litosfera oceánica vuelve a hundirse en el manto en las zonas de subducción, que dejan unas cicatrices aparatosas en el suelo oceánico en forma de fosas profundas. En esos lugares la laja litosférica descendente acarrea sedimentos marinos húmedos y basalto hacia el interior del manto.

A unos 80 kilómetros de profundidad, el calor transporta el agua y otros componentes volátiles desde los sedimentos subducidos hasta el manto suprayacente. Estas sustancias se comportan entonces como fluidos en una forja: inducen la fusión en el material circundante a temperatura reducida. El magma así producido termina por alcanzar la superficie, donde desencadena espectaculares erupciones explosivas. Lo ocurrido en el Pinatubo y el Monte Santa Helena son dos ejemplos recientes de tales cataclismos geológicos. Las grandes cadenas de volcanes —como los Andes— impulsadas por sustancias volátiles en ebullición agregan una media anual de unos dos kilómetros cúbicos de lava y ceniza a los continentes.

Pero el volcanismo inducido por subducción no es la única fuente de nueva roca granítica. La acumulación de calor en el interior profundo de la propia corteza continental puede producir fusión; el magma resultante migrará, en última instancia, hacia la superficie. Aunque parte de este calor necesario puede proceder de la desintegración de elementos radiactivos, una fuente más plausible es el magma basáltico que asciende desde las profundidades del manto y queda aprisionado bajo la tapa granítica; la roca fundida actúa entonces como un quemador bajo una sartén.

Si bien el cambio más espectacular en la generación de corteza continental ocurrió a finales del eón Arcaico, hace 2500 millones de años, todo indica que los continentes no han dejado de experimentar, en el transcurso del tiempo geológico, diversos cambios episódicos. Sabemos, por ejemplo, que se produjeron adiciones bastante grandes a la corteza continental entre los intervalos temporales siguientes: entre hace 2000 millones de años y 1700 millones, entre 1300 y 1100, y entre 500 y 300 millones de años. Diríase, a primera vista, que la idea de una evolución a rachas de los continentes terrestres contradice lo esperado. Después de todo, ¿por qué la corteza habría de formarse de manera episódica si la generación de calor interno —y su liberación a través del reciclaje cortical— es un proceso continuo?

Pero esa aporía se deshace si atendemos a la naturaleza de la tectónica de placas. Durante el período Pérmico (hace unos 250 millones de años) los grandes continentes de la Tierra convergieron en una sola masa continental enorme, el supercontinente Pangea (*véase* “La Tierra antes de Pangea”, de Ian W. D. Dalziel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1995). No ha sido la única vez en que aconteció ese fenómeno. La formación del “supercontinente” se viene repitiendo a intervalos de unos 600 millones de años. Las pruebas disponibles sobre grandes ciclos tectónicos que disgregan y unen continentes se remonta al Proterozoico inferior, pero ciertos indicios apuntan a que el primer supercontinente pudo haberse formado antes, durante el Arcaico.

Estos ciclos tectónicos a gran escala sirven para modular el ritmo de crecimiento cortical. Cuando un supercontinente se despedaza, la corteza oceánica ha alcanzado el punto de máximo envejecimiento y, por consiguiente, tiene las mayores posibilidades de formar nueva corteza continental una vez que se subduzca. Cuando los continentes convergen de nuevo, las cadenas de volcanes creadas junto a zonas de subducción, o arcos volcánicos, chocan contra las elevaciones continentales. Tales episodios retienen corteza nueva, porque las rocas de arco se agregan a los márgenes de los continentes.

Durante más de cuatro mil millones de años esos continentes peripatéticos han sido el producto del ensamblaje a empellones de muchos litosferoclastos, pedazos dispares de litosfera. Enterrado en la amalgama resultante, yace el último testamento que se nos ha legado de la mayor parte de la historia de la Tierra. Esta historia, legible en rocas que son como piezas revueltas de un gran rompecabezas, ha tardado bastante en descifrarse. Pero cuanto conocemos ya sobre el origen y la evolución de la corteza es suficiente para poder afirmar que, entre todos los planetas, la Tierra resulta realmente excepcional. Por un afortunado accidente de la naturaleza —la capacidad de mantener la actividad de tectónica de placas— sólo ella ha podido generar los pedazos grandes de corteza continental estable que encontramos tan convenientes para vivir.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NO WATER, NO GRANITES-NO OCEANS, NO CONTINENTS. I. H. Campbell y S. R. Taylor en *Geophysical Research Letters*, volumen 10, número 11, páginas 1061-1064; noviembre, 1983.

THE CONTINENTAL CRUST: ITS COMPOSITION AND EVOLUTION. S. Ross Taylor y Scott M. McLennan. Blackwell Scientific Publications,1985.

OASIS IN SPACE: EARTH HISTORY FROM THE BEGINNING. Preston Cloud. W. W. Norton, 1988

THE GEOCHEMICAL EVOLUTION OF THE CONTINENTAL CRUST. S. Ross Taylor y Scott M. McLennan en *Reviews of Geophysics*, volumen 33, número 2, páginas 241-265; mayo, 1995.

NATURE AND COMPOSITION OF THE CONTINENTAL CRUST: A LOWER CRUSTAL PERSPECTIVE. Roberta L. Rudnick y David M. Fountain en *Reviews of Geophysics*, volumen 33, número 3, páginas 267-309; agosto, 1995.

El Hombre de Orce

En 1982 se exhumó un fragmento craneal en Venta Micena cuya antigüedad se evaluó en 1,6 millones de años. Tras una viva polémica se acepta hoy su carácter homínido

Domènec Campillo y Josep Gibert

La publicación en 1859 de *El origen de las especies* de Charles Darwin promovió una oleada de investigaciones sobre la evolución humana, búsqueda que se acentuó con *El origen del hombre y la selección en relación con el sexo*, otra obra suya que apareció doce años más tarde.

Ya antes, en 1856, se había descubierto un primer hombre fósil en la gruta de Feldhofer del valle de Neanderthal, a 12 kilómetros de Düsseldorf. Para Thomas Henry Huxley y Carl Fuhlrott, aquellos huesos fosilizados pertenecían a un hombre de tipología distinta del moderno. Para Rudolf Virchow, sin embargo, tales huesos sí eran de hombre moderno, aunque se trataba de un espécimen patológico. La búsqueda de "eslabones perdidos" había comenzado y, por lo que se refiere al caso humano, creíase que ese engarce debía ser un descendiente de algún simio semejante a los actuales.

Cuando Eugène Dubois, en la última década del siglo pasado, se trasladó a las Indias Holandesas a la caza de ese hipotético fósil, antes de que lo encontrara ya había sido bautizado por Ernst Haeckel con el nombre de *Anthropopithecus erectus*. Dubois le dio ese nombre al cráneo que desenterró en 1891 junto al río Solo en Trinil (Java); posteriormente lo llamó *Pithecanthropus erectus*, denominación que pervivió durante un largo período, hasta que se le aplicó la nomenclatura filética moderna, que lo convirtió así en *Homo erectus* Dubois.

Desde entonces se han multiplicado los descubrimientos de nuevos fósiles. Recordaremos sólo los que han tenido un peso mayor en la creación de los árboles filogenéticos. Los homínidos más antiguos, prehumanos, son los *Australopithecus* en sus variedades grácil y robusta. El primero, descubierto en 1925 por Raymond Dart, correspondía a un niño perteneciente a la tipología grácil, que fue exhumado en las minas sudafricanas de Taung. Robert Broom halló en 1938 el primer ejemplar de australopiteco robusto. En 1959, Mary Leakey encontró en el desfiladero de Olduvai el *Australopithecus boisei* y, en 1974, Donald Johanson descubrió en el valle abisinio del Omo la *Australopithecus afarensis*, cariñosamente conocida como Lucy, considerada ahora una hembra de pre-*Australopithecus,* cuya antigüedad se remontaría a unos 3,5 millones de años. Recientemente se han exhumado restos de *Ardipithecus ramidus* y *Australopithecus anamensis*, que son anteriores a Lucy. De importancia no menor son las pisadas fósiles que Mary Leakey encontró en Laetoli, que demuestran que hace más de tres millones de años había homínidos que caminaban en posición erecta.

Después del descubrimiento de Dubois en Java, el hallazgo más notable de *Homo erectus* se produjo en 1933. Davidson Black, Pierre Teilhard de Chardin, C. C.Young y Pei Wen-chung desenterraron en una gruta de Chukutien, a 50 kilómetros de Pekín, restos fósiles del que bautizaron *Sinanthropus pekinensis*, hoy denominado *Homo erectus sinensis*.

Para ser exactos, el primer neandertalense no se encontró en el valle de Neanderthal, sino en Gibraltar, pero no se determinó su tipología hasta después del descubrimiento del cráneo neandertalense, que dio nombre al grupo y que actualmente se integra entre los *Homo sapiens*; conforman los *Homo sapiens neanderthalensis*. Nuestro antepasado directo es el *Homo sapiens sapiens* fósil; exhumado en 1868 en Les Eyzies, el cráneo del Cro-Magnon, del que estamos hablando, tiene unos 30.000 años.

Los distintos grupos de homínidos que hemos mencionado y muchos otros primates fósiles anteriores que no citamos, constituyen el esbozo secuencial de la filiación humana. Aunque la aparición de nuevos fósiles obliga a modificar sin cesar la cadena filética, y no existe unanimidad sobre la secuenciación de los restos ya conocidos, puede decirse que los grandes trazos de la evolución humana están perfectamente delineados. Dentro de este contexto habrán de situarse los fósiles encontrados en Orce, que plantean un nuevo problema para la filiación humana, pero contribuirán, sin duda, a perfilar mejor el marco general.

La depresión de Guadix-Baza en la provincia de Granada, y en especial su sector nororiental, donde se encuentra el pueblo de Orce, presenta una sedimentación continuada desde el Plioceno superior, cuya antigüedad aproximada es de 3,5 millones de años, hasta el Pleistoceno medio, hace 0,5 millones de años. Durante ese intervalo temporal, se produjo en Orce una sucesión de alternancias de sedimentos fluviales y lacustres que pueden precisarse con detalle. Se aprecian cuatro secuencias lacustres, asociadas cada una a su correspondiente etapa fluvial. La región sorprende por su riqueza fosilífera y su excelente estado de conservación.

Los paleontólogos han desenterrado fósiles en los sedimentos del borde del lago plio-pleistoceno de la región de Orce, donde existieron amplias llanuras de gramíneas periódicamente

DOMENEC CAMPILLO y JOSEP GIBERT colaboran desde hace años en la interpretación paleontológica de los restos encontrados en el yacimiento de Venta Micena, en Orce. Campillo dirige el laboratorio de Paleopatología y Paleoantropología del Museo de Arqueología de Cataluña y da clases de historia de la ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona. Gibert se halla adscrito al Instituto Miquel Crusafont de Paleontología en Sabadell.

inundadas o zonas pantanosas. Los fósiles quedaron atrapados en charcas de agua dulce del interior de las llanuras de gramíneas, en los bordes de los pantanos o en los meandros tranquilos de antiguos ríos.

Las edades de estos yacimientos se han determinado por bioestratigrafía y paleomagnetismo; en próximas campañas se harán dataciones directas de los yacimientos de interés paleoantropológico. Por medio de los métodos citados podemos situar el yacimiento de Venta Micena muy próximo al límite superior del "subcrón Olduvai"; tendría, pues, una antigüedad de 1,5 a 1,6 millones de años.

Venta Micena funcionaba como un cubil de carroñeros. Los animales cazados en las llanuras por los grandes carnívoros, especialmente por el felino fósil ya extinguido *Homotherium*, serían transportados hasta el cubil por las hienas (*Pachycrocuta brevirrostris*); éstas serían también las que trasladarían probablemente los restos de nuestros antepasados que vivían en esas llanuras, entre los que se incluiría el fragmento craneal que vamos a describir.

En ese yacimiento se ha comprobado la presencia de acción antrópica, consistente en huesos rotos por acción directa que presentan estrías de descarnación. Se trata, además, de uno de los pocos casos en que durante el Plio-pleistoceno se observa competencia entre homínidos y hienas. Cabe, pues, la eventualidad de que el hombre de Venta Micena fuera cazado mientras intentaba aprovechar el tuétano de los huesos.

En 1976 Miquel Crusafont, entonces director del Instituto de Paleontología de Sabadell, consideró oportuno avanzar en los estudios paleontológicos del Cuaternario, encargando a Josep Gibert la realización de prospecciones en los lugares que se consideraban más idóneos, entre ellos la depresión de Baza y en especial la región de Orce. En dicha campaña se encontró el yacimiento de Venta Micena, pero no se iniciaron las excavaciones intensivas del lugar hasta 1982, gracias a una subvención de los ayuntamientos de Sabadell y Tarrasa. En esta campaña se encontró un fragmento craneal que se consideró atípico y difícil de adscribir a la fauna de mamíferos no humanos presentes en el yacimiento.

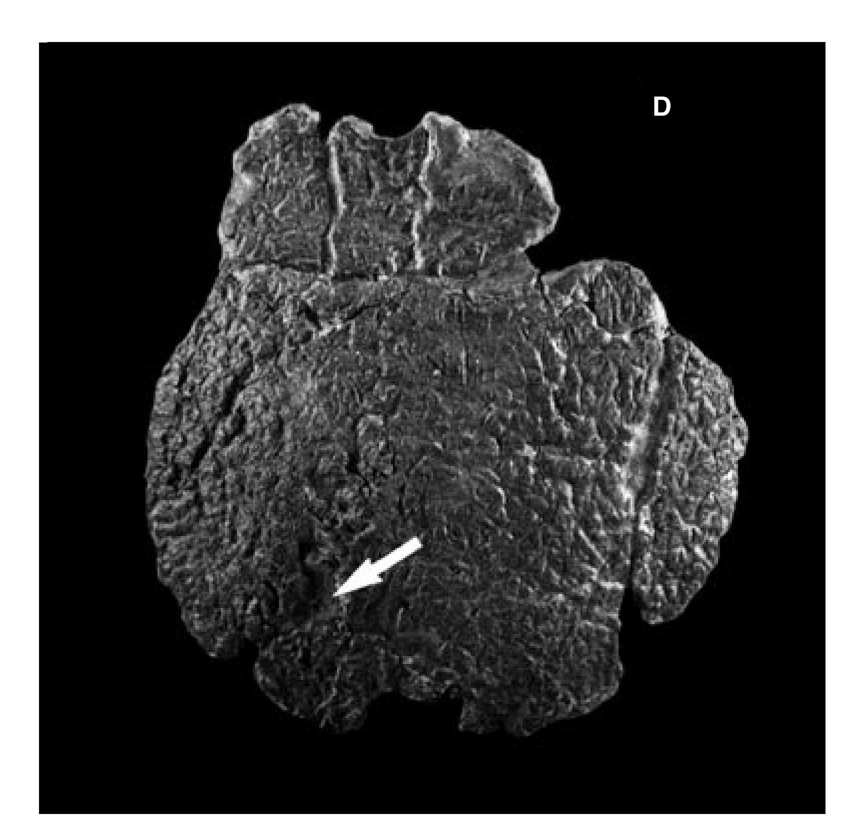
El hallazgo de este pequeño fragmento craneal fósil, que puede incluirse en un rectángulo de sólo 80 milímetros de longitud por 70 milímetros de anchura, llamó desde un comienzo la atención del mundo científico. Suscitó una viva polémica, por más que un experto en paleoanatomía advierte en seguida que corresponde a un fragmento craneal de la región lambdoidea, punto en donde los huesos parietales se unen con el hueso occipital; esa área, como veremos más adelante, presenta características morfológicas de sumo interés, peculiares en los primates en general y en la especie humana en particular.

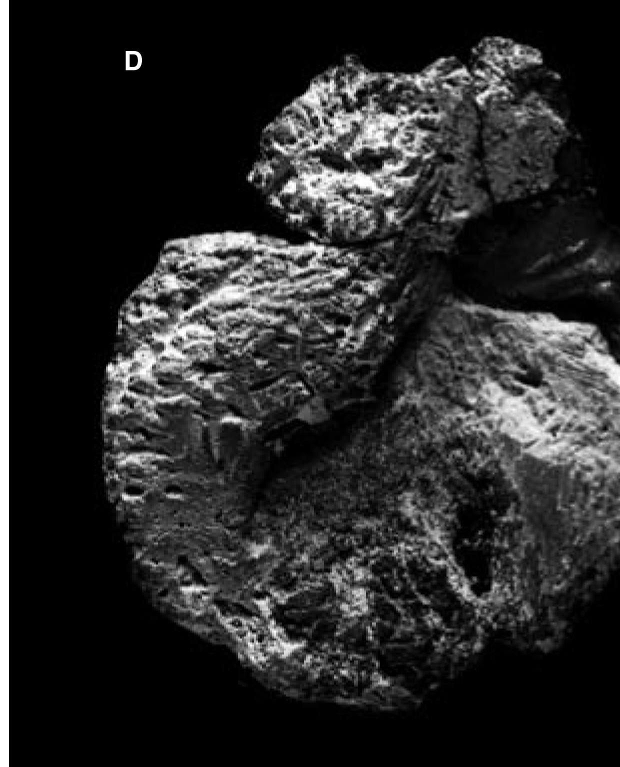
El examen macroscópico muestra que la mayor parte de esta pieza la constituyen dos porciones de los huesos parietales y otra diminuta del occipital. El fragmento del parietal derecho es la porción mayor, cuya superficie viene casi a doblar la del parietal izquierdo. Del hueso occipital sólo se conserva una pequeña porción triangular que corresponde a su vértice. Algunas fisuras póstumas surcan la superficie; apenas si ha habido deformación, muy discreta en su parte anterior.

Cuando se exhumó, la cara interna permanecía oculta, bajo una concreción calcárea fuertemente adherida. La superficie exocraneal presentaba signos de erosión con surcos reticulares póstumos que, en algunos puntos, sobrepasaban el milímetro. Las suturas craneales eran poco complicadas; a 18 milímetros del punto craniométrico lambda su trazado se hacía menos sinuoso, como ocurre en la región obélica del cráneo humano. Según suele ser habitual, faltaban los orificios parietales. La pequeña porción de la superficie endocraneal, visible, mostraba marcadas impresiones digitales, habituales en los niños a partir de los cuatro años. El espesor del cráneo era de unos 3 milímetros.



1. DEPRESION DE GUADIX-BAZA en las proximidades de Orce, en donde están ubicados los yacimientos de Venta Micena y de Barranco León "5". Presenta sedimentación continuada desde el Plioceno superior hasta el Pleistoceno medio.





2. FRAGMENTO CRANEAL exhumado en Venta Micena. La superficie exocraneal (*izquierda*) presentaba signos de erosión con surcos reticulares póstumos. Se aprecian nítidamente dos porciones de los huesos parietales y un pequeño fragmento del occipital. La flecha señala el punto lambda. El resto fósil apareció con la cara interna oculta bajo una concreción calcárea fuertemente adherida (*centro*). Esta porción de la superficie endocraneal muestra impresiones digitales,

La cara endocraneal se limpió de la gruesa concreción calcárea que la recubría, sin que se deformase la pieza ni se deteriorase, salvo la pérdida de unas décimas de milímetro del fino borde superior de una cresta occipital, que comentaremos.

La morfología de la cara endocraneal era típicamente humana, aunque la presencia de la cresta que se iniciaba en el vértex llamó la atención de algún paleontólogo y fue la causa de la polémica que posteriormente se originó en torno a este fósil. Desde el punto de vista anatómico, era de destacar que el surco del seno longitudinal superior seguía un curso un poco lateralizado a la derecha de la sutura sagital. Este surco se podía percibir con nitidez desde unos 27 milímetros de lambda, observándose que luego se desviaba hacia la derecha al penetrar en la escama occipital, quedando delimitado en su borde derecho por una notable cresta sagital cuya elevación aumentaba al distanciarse del punto lambda. Debemos destacar que estas asimetrías en la cara interna de la escama occipital son tan frecuentes, que puede decirse que constituyen la norma, hecho reconocido por los anatomistas.

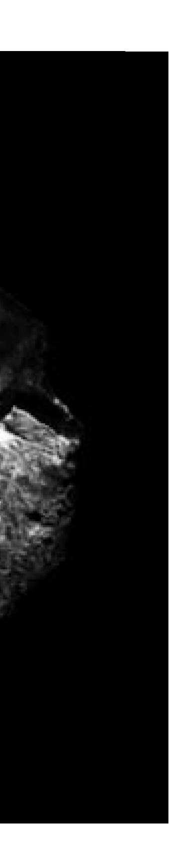
¿Qué decir de la cresta? Estas formaciones no son infrecuentes, sobre todo en los niños, según puso de manifiesto uno de los autores (Campillo) en colaboración con J. A. Barceló; cuando tales formaciones se dan y contornean al *sinus sagittalis* superior, es más elevada la correspondiente al borde contrario a su sentido de giro. Esas características morfológicas coinciden con la amplia variabilidad anatómica que se puede objetivar en la impronta que los senos venosos de la duramadre dejan en la cara interna de la escama occipital. En la radiografía obtenida de la cresta se observan la sutura sagital y las impresiones digitales, así como las fisuras póstumas. Las imágenes radiográficas no se apartan de la normalidad en un cráneo humano infantil.

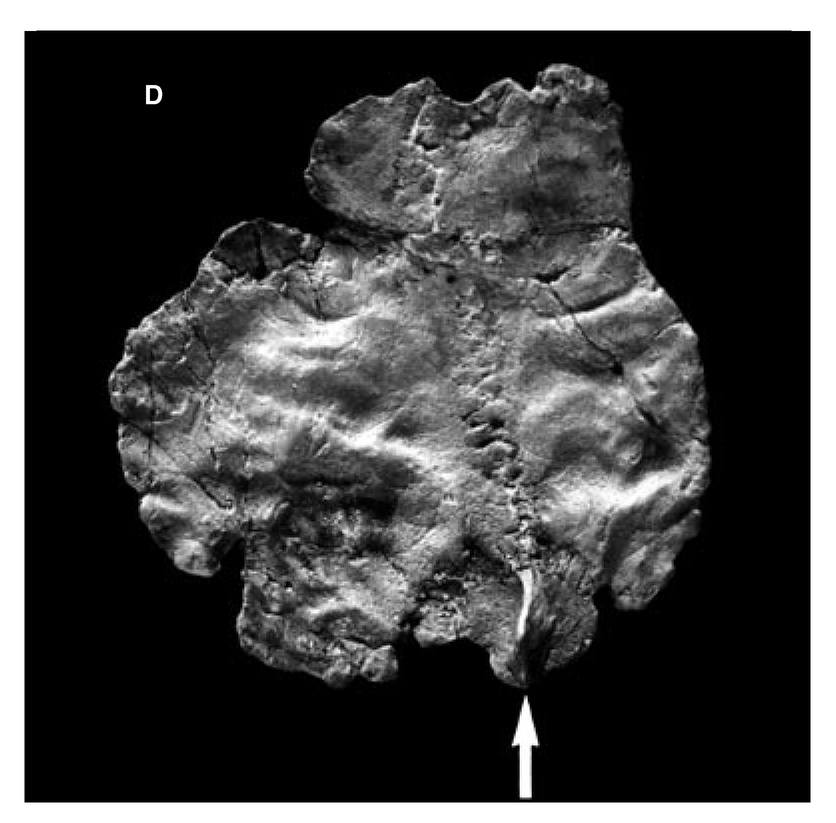
La edad que tenía el individuo cuando falleció corresponde con toda seguridad a un niño de unos cinco o seis años, período en que las impresiones sagitales se marcan con mayor intensidad.

El volumen craneal resulta muy difícil de evaluar. A tenor de su curvatura sería grande, sobre todo en comparación con otros homínidos. Sin embargo, es probable que se hubiese producido cierto grado de aplanamiento por "presión de tierras", aunque debemos advertir que, a los cinco años, los cráneos infantiles tienen casi el mismo volumen que un adulto, y su perímetro en el niño actual no aumenta más de 20 a 30 milímetros.

Cuando se exhumó el fósil, Gibert y otros que lo descubrieron apuntaron la posibilidad de que se tratase de un fragmento de cráneo humano. Pero había una objeción de peso: dada la antigüedad del estrato, no podía admitirse la presencia allí de un *Homo*. Campillo, que examinó la pieza antes de la limpieza de su cara interna, compartió el criterio de los paleontólogos, y a esa opinión se abonó, entre otros, Henri de Lumley, quien se trasladó a Orce, manifestando que el hallazgo era "patrimonio de la humanidad".

La polémica se entabló a mediados de 1984, cuando en París Marie Antoinette de Lumley apuntó la posibilidad de que se tratase de un potro de dos meses. Dio la casualidad que acababa de examinar uno de esa edad y consideró que el fragmento craneal de Orce podía corresponder al género *Equus*. Campillo y Gibert disintieron del carácter equino del fósil, convencidos de que correspondía a un *Homo* sp. Los antiguos colaboradores de Gibert, Jordi Agustí y Salvador Moyà Solà, aceptaron el diagnóstico





habituales en los niños a partir de los cuatro años. La fotografía de la derecha muestra la cara interna una vez eliminadas las concreciones calcáreas. La flecha apunta hacia la cresta occipital que suscitó la polémica paleontológica. (La letra *D* indica el lado derecho).

de M. A. de Lumley, criterio al que se adhirieron numerosos especialistas de España, que en su mayoría nunca habían examinado el fósil.

La polémica saltó a la prensa, donde la opinión de los descubridores fue objeto de chanza. Se trata éste de un fenómeno que tiene varios antecedentes en la historia de la ciencia, en particular en el ámbito de la evolución y la paleontología humanas. Recuérdese el ataque desafortunado de Samuel Wilberforce, obispo anglicano de Oxford, contra la teoría darwinista y la defensa de Huxley, o la polémica surgida a propósito del descubrimiento en 1925 por Raymond Dart del cráneo infantil del primer *Australopithecus* procedente de Taung.

En paleontología humana rara vez se encuentran restos esqueléticos de un cráneo entero: lo frecuente son fragmentos, como en nuestro caso. La interpretación depende de la porción ósea que se conserve. Las mandíbulas y las maxilas, aunque sean restos fragmentarios, tienen gran valor, sobre todo si se conservan algunas piezas dentarias, dada la especificidad de los dientes en cada especie. Así, por ejemplo, el Hombre de Mauer y el de Bañolas están representados exclusivamente por sus mandíbulas. Más aún, Max Schlosser publicó en 1903 su informe sobre un diente de *Homo erectus sinensis* procedente de una farmacia china, 25 años antes de que comenzasen las excavaciones de Chukutien. Algunas veces, los restos muy fragmentados permiten una reconstrucción, como es el caso del *Homo rudolfensis* (KNM-ER 1470) que realizó Meave Leakey a partir de unos "trescientos fragmentos".

En el "Hombre de Orce", o de Venta Micena (VM-0), el carácter de homínido lo fundamentamos en la presencia en el fragmento craneal de caracteres específicos de la especie humana, así como en pruebas indirectas que demuestran la actividad humana o antrópica en la región y en el período cronológico a que pertenece el estrato donde se exhumó el fósil.

¿Cuáles son las pruebas específicas en que fundamos nuestra tesis? En primer lugar, la base anatómica. La morfología de VM-0 resulta totalmente compatible con la de los homínidos hasta ahora descubiertos y con la del hombre actual. Como dijimos antes, se trata de una región ósea muy característica con rasgos comunes de primates, sobre todo en los de rango superior, donde se incluyen los antropomorfos u hominoideos. En todos ellos, el *confluens sinuum* (prensa de Herófilo o tórcula), que está conformado por el seno longitudinal superior, el seno recto y en ocasiones por el seno occipital, da origen a los *sinus transversi*, o senos laterales. Esta estructura siempre se sitúa en las proximidades del endinión, o protuberancia occipital interna, generalmente un poco por debajo. Precisamente esta situación da al entrecruzamiento la forma de cruz y hace que, por expansión evolutiva de la escama occipital suprainiana o neo-occipital, el seno sagital superior la surque siguiendo la línea media, pudiendo dejar su impronta mediante un surco o crestas. La variabilidad de la impronta ósea es muy elevada, pero al igual que ocurre con las impresiones digitales endocraneales las improntas venosas están más marcadas en los niños, tendiendo a atenuarse en los adultos a causa del aumento del espesor del cráneo, sobre todo a nivel del vértex, por formar parte del arbotante posterior de Felizet.

En general, el seno sagital suele dar origen al seno lateral derecho, mientras que el seno recto acostumbra originar el lateral izquierdo. El seno lateral derecho resulta mayor por captar la sangre de la convexidad de los hemisferios, cuyo volumen supera la que acoge el seno recto. Es frecuente que el seno sagital se desvíe antes de llegar al endinión, en ocasiones en el vértex occipital; si el seno sagital está enmarcado por crestas, la situada en el lado contrario al sentido de giro suele ser mayor, circunstancias que concurren en el Hombre de Orce.

Las impresiones digitales de VM-0 son normales para un niño de unos cinco años, edad en que éstas se muestran con mayor intensidad. No se pueden considerar fruto de una hipertensión intracraneal, pues a esa edad, en que no se ha iniciado todavía la sinostosis de las suturas craneales, tal patología iría asociada a una diastasis de las suturas, hecho que no concurre en el niño de Orce.

Una segunda prueba directa nos la ofrece la anatomía comparada de primates y équidos. La morfología de los antropomorfos es similar a la humana. Hominoideos y humanos difieren sólo, a este respecto, en las dimensiones del hueso occipital de la región suprainiana; por lo que atañe a la región infrainiana divergen en la posición, en parte por la oblicuidad del orificio occipital.

En los mamíferos tetrápodos, la escama occipital suprainiana es prácticamente inexistente y el inión co-

incide con el punto craniométrico lambda. Como describieron magistralmente A. Delattre y R. Fenard en 1960, los senos laterales cursan sobre las suturas lambdoideas, siguen los surcos transversos parietales y penetran en los canales temporales, pero no surcan la escama occipital.

Con respecto a los équidos debemos destacar varios aspectos. En primer lugar, el volumen craneal de VM-0 no parece propio de équido, sino equiparable al de cualquier otro homínido subadulto. En segundo lugar, la distancia entre lambda y una supuesta sutura coronal (así ha interpretado algún autor una clara fractura póstuma, que cursa con oblicuidad invertida, en sentido anterior en el parietal derecho y posterior en el izquierdo) es exagerada para un équido, en los que no sobrepasa los 25 milímetros, mientras que en VM-0 es de 40 milímetros, admitiendo como sutura coronal la indiscutible fractura. En tercer lugar, suponiendo que el fragmento occipital fuese el hueso interparietal de un équido, la angulación del vértex es incompatible: 119 grados en VM-0 e inferior a los 70 grados en los interparietales equinos de morfología triangular. En cuarto lugar, la cresta de VM-0 es totalmente distinta de la protuberancia occipital interna de los équidos, que se sitúa en el hueso interparietal.

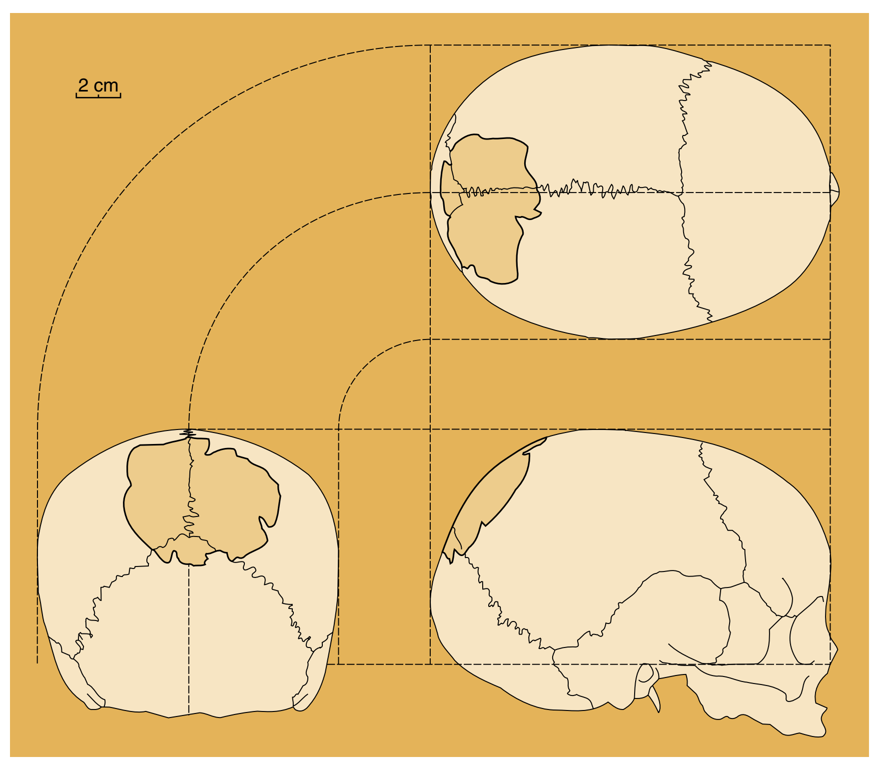
La tercera fuente de pruebas directas nos la proporciona la paleoinmunología. En efecto, los análisis paleoinmunitarios realizados por E. García Olivares demostraron la proximidad inmunitaria con el hombre actual y su gran distanciamiento de los equinos. Los exámenes paleoinmunitarios de équidos de Venta Micena mostraron su afinidad con los équidos actuales y su distanciamiento con VM-0 y con el hombre moderno. Estas pruebas fueron también realizadas por Gibert y Jerold Löwenstein, de la Universidad de California, confirmando los resultados.

Por último, la geometría fractal. P. Palmqvist, de la Universidad de Málaga, ha realizado el estudio geométrico fractal de las suturas de VM-0 demostrando que su morfología queda muy distante de los équidos. No permite deducir a qué tipo de *Homo* corresponde e incluso podría prestarse a confusión con algunos cercopitécidos, pero en éstos, a diferencia del niño de Venta Micena, la capacidad craneal es muy baja.

¿Qué nos dicen las pruebas indirectas? Aunque solamente el estudio del fósil de Venta Micena puede atestiguar su carácter humano, la presencia de otros restos óseos de homínidos, las pruebas de actividades antrópicas y la concurrencia de utensilios líticos que los homínidos empleaban para facilitar sus actividades permiten afirmar que VM-0 no es un hallazgo excepcional y que otros homínidos habían habitado la región. La recuperación de nuevos fósiles sólo requiere la práctica de excavaciones sistemáticas en los lugares adecuados. Tras VM-0 se han recuperado, además, otros restos de homínidos. En Venta Micena apareció una diáfisis humeral juvenil (VM-1960) en 1988 y un fragmento distal de un húmero (VM-3691) en 1989; en las proximidades de ese lugar, en Barranco León "5", se encontró un fragmento de molar inferior (BL5-0).

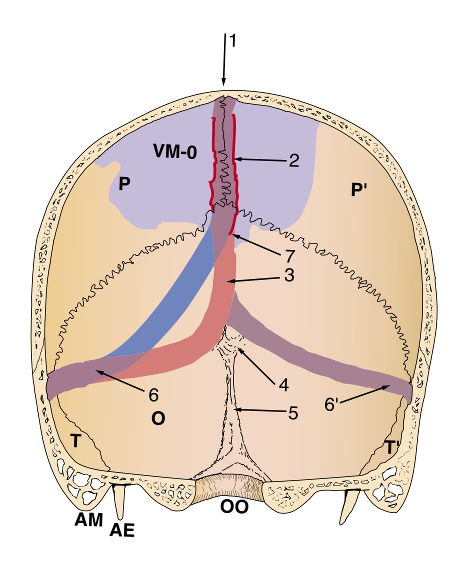
Para estudiar la dieta alimentaria se recurre a la determinación de los elementos traza retenidos en los restos óseos. Asumpció Malgosa, que ha seguido esa línea de investigación en la fauna de Venta Micena, ha abordado también el homínido VM-3691. Muestra este resto unas elevadas concentraciones de estroncio, niveles moderadamente altos de bario y cobre y valores bajos de zinc; esas proporciones se corresponden con el esquema teórico de una dieta rica en vegetales (Sr y Ba) y un escaso aporte cárnico (Zn). El cobre podría apuntar a una ingesta de frutos silvestres. Son resultados que están conformes con la dieta que se supone en los homínidos muy antiguos, en la que predominarían los vegetales sobre una pequeña parte de proteínas animales. La fracción cárnica sería fruto del oportunismo carroñero y de la caza de animales pequeños, que no representarían más de un 20 % de la dieta.

En las excavaciones realizadas en 1995 se han encontrado numerosas industrias líticas en Barranco León "5", de una antigüedad algo superior a Venta Micena, y en Fuentenueva "3", de antigüedad algo menor. En ambos yacimientos, aunque con mayor claridad en Barranco León "5", se detecta una acción antrópica, bien conocida en África, de instrumentos de sílex para descuartizar los hipopótamos muertos por causas naturales, y así aprovechar su carne.



3. CRANEOGRAMAS para mostrar la situación que el fragmento craneal de Orce ocupaba en el cráneo.

¿Cómo era el niño de Venta Micena? Resulta imposible determinar su morfología exacta, al no disponer de elementos suficientes para reconstruir su busto aplicando las leyes de la homología. Ahora bien, si nos atenemos a las representaciones artísticas que se han hecho del australopiteco infantil de Taung y de algunos *Homo erectus*, podríamos establecer que debía tener cierta semejanza con ellos. La facies sería infantil, sin mentón, con menor procidencia del macizo facial



4. ESQUEMA de la región posterior u occipito-parietal del cráneo, visto por su cara encefálica para una mejor comprensión de la problemática morfológica del sistema de drenaje venoso en el niño de Orce. *D*, lado derecho; *VM-0*, sector sombreado, que corresponde al fragmento craneal conservado en el fósil; *P*, parietal derecho; *P'*, izquierdo; *O*, occipital; *T*, temporal derecho y *T'*, izquierdo; *AM*, apófisis mastoides; *AE*, apófisis estiloides; *OO*, orificio occipital; *1*, surco del seno sagital; *2*, punto lambda; *3*, tórcula, punto donde confluyen los senos venosos sagital y recto, bifurcándose para dar origen a los senos laterales; *4*, endinión; *5*, cresta sagital interna; *6*, seno lateral derecho y *6'*, izquierdo; *7*, cresta sinusal izquierda, origen de la polémica entorno a VM-0. En azul, trayecto del seno sagital a nivel de los parietales y probable trayecto en el cráneo de Orce en atención a su modo de inicio en el vértice occipital (*7*) (morfología VA-2, con 1,2 % de frecuencia); en rosa, morfología más frecuente en el vértice (morfología VB-1, 60,2 % de frecuencia) y conformación de los senos laterales (morfología HS-3, 29,2 % de frecuencia, según la clasificación de Campillo y Barceló). En rojo, crestas que enmarcan el surco del seno sagital en VM-0.

en atención a su edad. Las superestructuras faltarían, pues comienzan a mostrarse al terminar la pubertad, y no están muy desarrolladas ni en los australopitecinos gráciles ni en los *Homo habilis*, menos aún si se tratase de un individuo de sexo femenino, factor que ignoramos por completo. El volumen craneal sería casi igual al de un adulto, pero insistimos en que nos movemos dentro del ámbito de las conjeturas.

¿Por qué se encuentran restos humanos e industrias líticas en el sur de la península Ibérica en el Pleistoceno inferior? Esta pregunta se convirtió en el ritornelo común del Congreso Internacional de Paleontología Humana de Orce, celebrado en septiembre de 1995. No es fácil contestarla. En nuestro continente, la presencia humana bien datada se sitúa en torno a los 780.000 años de Atapuerca y Mauer o en los 500.000 de Boxgrove, muy lejos del 1,8 millones de años de Barranco León "5".

Conviene precisar de entrada que las condiciones geológicas son determinantes para localizar restos fósiles. No hay en Europa depresiones con características similares a las de Baza, lo que limita las áreas en donde pueden fosilizarse los homínidos del Plio-pleistoceno. Cabe, pues, la presencia de homínidos de estas edades en Europa, pero no se fosilizaron por no darse las condiciones apropiadas. Llama, sin embargo, la atención que no se haya encontrado todavía ningún vestigio en simas y otras trampas naturales.

En el citado congreso se aportaron datos fiables que respaldan la hipótesis de un corredor de paso de Africa a Europa a través del estrecho de Gibraltar. Lo mismo en Orce que en Cueva Victoria, yacimiento kárstico del Plio-pleistoceno de Cartagena, se ha encontrado fauna africana; en el primero, un ejemplar de *Megantereon withei*, pequeño carnívoro, y en el segundo un gran cercopiteco antepasado de los actuales geladas, el *Theropithecus oswaldi*. En ningún otro yacimiento de Europa se encuentra fauna africana. ¿Pasaron los *Megantereon*, *Theropithecus* y *Homo* el estrecho de Gibraltar?

Existen pruebas que muestran un fuerte descenso del nivel del mar hace unos 2,3 millones de años, coincidente con un enfriamiento generalizado del planeta. El nivel de las aguas del estrecho de Gibraltar bajó unos 180 metros, y la franja de agua se acortó hasta unos 8 kilómetros con una isla en medio. Una barrera franqueable, como nos lo confirman los modelos de Java, donde la isla de Flores, separada de Java por 20 kilómetros de mar profundo, fue colonizada por el hombre y los elefantes hace aproximadamente un millón de años, superando ese brazo de mar. ¿Por qué no pudo suceder lo mismo en Gibraltar?

Daniel Turbón y otros proponen una primera colonización de Europa durante el Plio-pleistoceno. A esta primera oleada, muy débil y formada por algunas bandas de homínidos que se extinguieron en el Pleistoceno medio, le sucedería en este período una llegada masiva de humanos procedentes de Oriente.

¿Dónde ubicar el hombre de Orce en la filogenia humana? El descubrimiento del homínido de Venta Micena ha planteado más problemas que ha resuelto sobre la evolución de nuestra especie y su expansión hacia Eurasia desde Africa, considerada la cuna de la humanidad.

Hasta hace poco, la presencia humana en la península Ibérica se consideraba la más reciente de Europa, con una antigüedad que no iba más allá de los 200.000 años. Esa tesis ha quedado arruinada con los descubrimientos de Atapuerca, que retrotraen los primeros habitantes hasta hace casi unos 800.000 años. Antes de los sorprendentes hallazgos de ese yacimiento burgalés, los hitos más remotos eran el hombre de Mauer, en Centroeuropa y con unos 500.000 a 700.000 años, y los hombres de Tautavel, en el sur de Francia y con poco más de 400.000 años. Nadie imaginaba la posibilidad de homínidos en el sur de España hace unos 1,6 millones de años. (No se olvide que se creía en un proceso que avanzaba de Oriente a Occidente.) Pues bien, esta presencia humana es lo que confiere mayor valor al hallazgo, por detectarse en época tan temprana.

Diversas son las hipótesis sobre cómo pudo llegar allí. Pero un dato es incontrovertible: su asentamiento. En estos momentos, la investigación, pese a la multitud de trabajos realizados, apenas ha progresado. No sabemos todavía si permaneció en nuestro suelo para siempre, si fue una presencia temporal hasta su extinción, si pertenecía al phylum que desembocó en nuestra especie moderna o si pertenecía a otra rama que no prosperó.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOBRE LA IDENTIDAD DEL FRAGMENTO CRANEAL ATRIBUIDO A *HOMO* SP. EN VENTA MICENA (ORCE, GRANADA). J. Agustí y S. Moyà-Solà en *Estudios Geológicos*, n.º 43, páginas 535-538; 1987.

LOS RESTOS HUMANOS DE ORCE Y CUEVA VICTORIA. Dirigido por Josep Gibert, Domingo Campillo y E. García-Olivares, Institut Paleontològic Dr. M. Crusafont; Barcelona, 1988.

PRESENCIA HUMANA EN EL PLEISTOCENO INFERIOR DE GRANADA Y MURCIA. Dirigido por Josep Gibert, Museo de Prehistoria J. Gibert; Orce, Granada, 1992.

Explicación de todo

Madhusree Mukerjee

Una leve brisa agita el aire caliente bajo el cobertizo, pero apenas alivia a los físicos que se cobijan en su sombra. El grito estridente de una urraca interrumpe la entonación uniforme de la relatora. "Quiero que mi gravedad canónica tetradimensional sea única en el infinito", dice Renata Kallosh, de la Universidad de Stanford, mientras garabatea ecuaciones en la improvisada pizarra. Llega de lejos el crescendo de un concierto, y de pronto dejan de oírse sus sones. Jeffrey A. Harvey, de la Universidad de Chicago, pregunta:

—Que tus agujeros negros tengan masa nula, ¿qué quiere decir? ¿Se mueven a la velocidad de la luz?

—No, no tienen nada, ni siquiera cantidad de movimiento —se vuelve y contesta Gary T. Horowitz, de la Universidad de California en Santa Bárbara.

—¡Qué disparate! —ahora es Leonard Susskind, de Stanford.

—¡No tienen energía, no tienen cantidad de movimiento, ahí no hay nada! —protesta Harvey.

El acalorado debate, dejado sin resolver, pasa a otra cosa. Se trata de una disputa más entre las frecuentes en que se enzarzan los reunidos en el Centro Aspen de Física, en las Montañas Rocosas de Colorado. En el ambiente se masca una excitación a duras penas reprimida. La teoría del todo, o TOE ("Theory of Everything"), creen los teóricos, espera a la vuelta de la esquina.

Cuando por fin se conozca la TOE —prosigue el sueño—, será tan sencilla que podremos escribirla con una sola ecuación y resolverla. La solución describirá un universo que, inconfundiblemente, será el nuestro: con tres dimensiones espaciales y una temporal, con los quarks, los electrones y las demás partículas de que están hechas las sillas, las urracas y las estrellas; con gravedad, fuerzas nucleares y electromagnetismo para mantenerlo todo unido; y hasta con la gran explosión donde todo empezó. Se pondrá de manifiesto el estrecho parentesco que hay entre los paradigmas principales de la física —la mecánica cuántica, la gravedad de Einstein. "Los conceptos de la física, tal y como los conocemos hoy en día, cambiarán de raíz cuando la teoría se desarrolle", predice Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey.

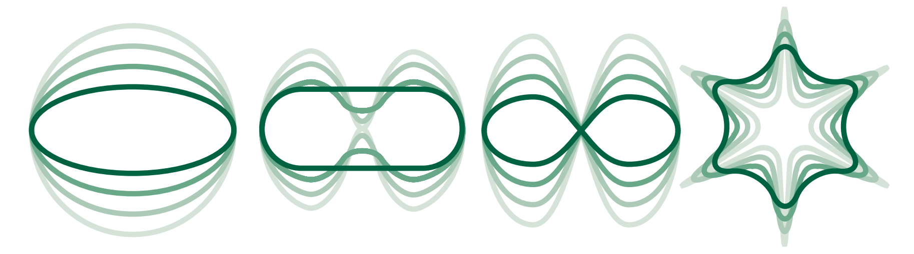
Una simetría nueva, la dualidad, está cambiando la idea que los físicos suelen forjarse de las partículas fundamentales, o cuerdas. Marca además el camino hacia una teoría de todo

También se echaron las campanas al vuelo hace diez años, cuando la "teoría de cuerdas" ganó predicamento en su calidad de candidata a TOE. Los físicos la habían elaborado a partir de la idea de que los objetos más elementales del universo son unas cuerdas inimaginablemente finísimas cuyas ondulaciones generan todas las partículas y fuerzas del universo. Estos bucles o segmentos de cuerda miden unos 10^{-33} centímetros de largo y vibran, como las cuerdas de un violín, en muchos modos diferentes. A cada modo vibracional le corresponde una energía fija, razón por la cual, según las leyes de la mecánica cuántica, cabe considerarlos partículas. Pero la teoría de cuerdas pronto se topó con barreras matemáticas: se fragmentó en cinco teorías competidoras. "Cinco teorías unificadas resulta feo", comenta mordazmente Andrew Strominger, de la Universidad de California en Santa Bárbara. Peor aún, las teorías tenían miles de soluciones, la mayoría de las cuales no se parecían nada a nuestro universo. Cuando se le pidió en 1986 que resumiese la TOE en siete palabras, Sheldon L. Glashow, de la Universidad de Harvard, crítico persistente de la teoría, exclamó con fingida angustia: "Dios mío ¿por qué me has abandonado?"

Soledad que, por lo que parece, se acaba de remediar. Una peculiar simetría nueva, la dualidad, va haciendo que las diferentes cuerdas se entrelacen. La dualidad está redefiniendo la idea que los físicos tienen de qué es una partícula fundamental, o cuerda. Ahora parece que los objetos elementales están hechos de las mismas partículas que crean. Witten no sólo cree que la dualidad nos llevará a la TOE, sino que podría además aclarar por qué el universo es como es. "Nos encaminamos hacia una explicación de la mecánica cuántica", afirma. No se pueden oír muchas voces críticas: la complicación matemática que encierra la teoría de cuerdas ha dejado fuera del ruedo a la mayoría de físicos y matemáticos.

Al propio tiempo, el mundo que emerge de la dualidad se está volviendo aún más raro. Las cuerdas se convierten con facilidad en agujeros negros y viceversa; dimensiones nuevas se amplifican en diferentes dominios; y no sólo fluctúan cuerdas por los caminos del universo, sino también burbujas y otras membranas. La multitud de conexiones, creen los investigadores, apunta a una entidad más profunda —la TOE, se presume— que lo explicaría todo. "Es como los chopos", agrega Michael J. Duff, de la Universidad Texas A&M, y acompaña lo que dice con las manos. "Hay un sistema de raíces que se extiende bajo el suelo. Sólo ves lo poco que sale a la superficie."

1. UNA CUERDA ELEMENTAL, inspeccionada de cerca, resulta ser un intrincado objeto compuesto, tejido con las mismas partículas y cuerdas que genera.



2. DIVERSOS MODOS DE VIBRACION inducibles en una cuerda. La mecánica cuántica admite que las ondas se interpreten como partículas. Si los bucles de cuerda de unos 10^{-33} centímetros de longitud son los constituyentes fundamentales de la materia, sus energías vibracionales serán las masas de las partículas elementales: electrones, quarks y fotones.

La palabra “dual” —que está desplazando rápidamente a “súper” en el elenco de términos comodín en la teoría de partículas— tiene para los físicos muchas connotaciones diferentes. A grandes rasgos, se dice que dos teorías son duales si, aparentemente disímiles, aportan iguales predicciones físicas. Por ejemplo, si se intercambian todas las magnitudes eléctricas y magnéticas de las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell, se obtiene, nominalmente, una teoría distinta. Pero si se admite que, además de las cargas eléctricas, hay en el mundo cargas magnéticas (como un polo norte aislado de una barra imantada), las dos teorías resultan ser exactamente la misma, o duales.

Más concretamente, la dualidad hace que sean intercambiables los objetos elementales y los compuestos: que una partícula, u otra entidad, sea fundamental o conste de entidades aún más fundamentales depende del punto de vista. Cada perspectiva acaba por dar los mismos resultados físicos.

Los primeros indicios de la dualidad aparecieron mientras se trabajaba en las teorías cuánticas de campos, que describen las partículas como ondas mecanocuánticas que se extienden por el espacio-tiempo. En la teoría de campos llamada cromodinámica cuántica (QCD), los quarks son partículas elementales dotadas de un tipo de carga, muy similar a la eléctrica, que recibe el nombre de color. En virtud del color, los quarks se atraen entre sí con mucha intensidad, se juntan en parejas y tríos y forman partículas compuestas mayores (por ejemplo, los protones).

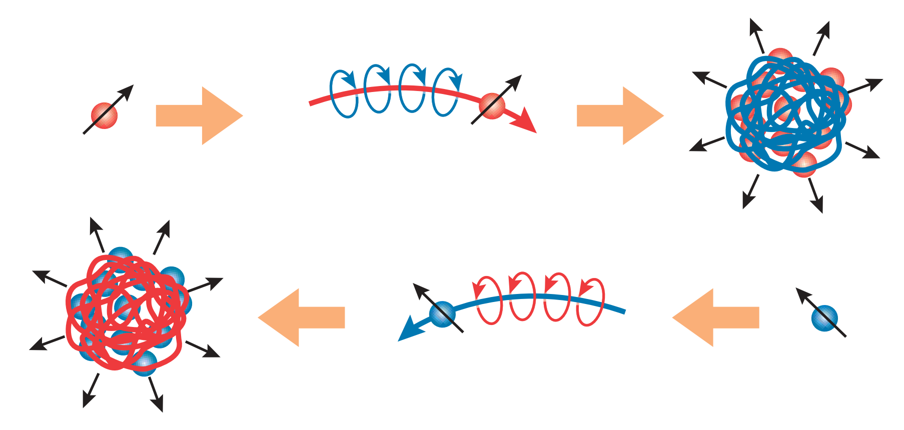
Lo mismo que en el mundo al que estamos acostumbrados no hay partículas con carga magnética, tampoco las hay con carga magnética de color. Pero en 1974 Gerard ‘t Hooft, de la Universidad de Utrecht, y Alexander Polyakov, por entonces del Instituto Landau, cerca de Moscú, describieron de qué manera podrían los campos que forman quarks enredarse en pequeñas bolas dotadas de carga magnética de color. Estos amasijos —que los físicos dibujan bajo la forma de esferas parecidas a erizos y acribilladas de flechas que representan vectores— reciben el nombre genérico de solitones y se comportan como partículas. Por tanto, una teoría de los quarks con carga de color podría suponer además la existencia de solitones con carga magnética de color o, por otro nombre, monopolos. Los monopolos serían partículas compuestas derivadas de los campos de quarks, más elementales.

En 1977 David Olive y Claus Montonen, que trabajaban en el CERN, cerca de Ginebra, conjeturaron que las teorías de campo en las que participa el color podrían ser duales. Es decir, en vez de que los quarks fuesen elementales, y compuestos los monopolos, quizá cabría tomar a los monopolos por elementales. En tal caso, se podría partir de una teoría de campos con monopolos que interactuasen entre sí y hallar que daba lugar a unos solitones análogos a los quarks. El enfoque basado en los quarks y el basado en los monopolos producirían los mismos resultados físicos.

La mayoría recibió con escepticismo la propuesta. Se pensaba que, aun cuando existiese la dualidad, sería imposible establecer que así era: las matemáticas de la QCD son sumamente arduas y había que calcular dos conjuntos de predicciones y compararlas. “En física es muy raro que se pueda calcular algo exactamente”, señala Nathan Seiberg, de la Universidad Rutgers. En febrero de 1994, sin embargo, Ashoke Sen, de la Institución Tata, en Bombay, mostró que en ciertas ocasiones podían comprobarse con exactitud las predicciones de la dualidad, y que resultaban correctas.

El cálculo transformó la comunidad de las cuerdas. “Witten pasó de decirle a todo el mundo que era una pérdida de tiempo a decir que no había nada más importante en que trabajar”, se ríe Harvey. Witten, al que los detractores de la teoría de cuerdas llaman a menudo “el Papa”, ha iniciado muchas de las tendencias de la física de partículas de los últimos veinte años.

Mientras, Seiberg desarrollaba un atajo computacional utilísimo para el estudio de la QCD. Su trabajo se basaba en la supersimetría. En virtud de la supersimetría, para cada uno de los tipos de partículas que constituyen la materia, debe haber



3. LA DUALIDAD es un tipo de simetría, gracias a la cual podemos considerar equivalentes las entidades compuestas a las partículas fundamentales, y viceversa. Pensemos en el quark, que tiene un tipo de carga, el color (*rojo*). Las cargas eléctricas en movimiento generan campos magnéticos; análogamente, los quarks en movimiento generan campos magnéticos de color (*azul*). A veces, muchos quarks se enredan y forman un objeto compuesto, un monopolo, que presenta carga magnética de color (*arriba a la derecha*). La dualidad, sin embargo, nos permite considerar al monopolo una partícula fundamental (*abajo a la derecha*). Los monopolos, a su vez, se aglomeran y forman quarks, que son entonces objetos compuestos (*abajo a la izquierda*). Las flechas (*negras*) simbolizan propiedades vectoriales de las partículas, como el momento angular.

una partícula asociada que transmite una fuerza, y viceversa. Todavía hay que encontrar esta simetría en la naturaleza, pero los teóricos suelen resaltar su potencia.

Seiberg mostró, sirviéndose de la supersimetría para constreñir las interacciones entre las partículas, cómo podían hacerse algunos cálculos de la QCD hasta entonces inabordables. El y Witten demostraron a continuación el carácter dual de las versiones de la QCD que incluyen la supersimetría.

Hay un beneficio inmediato, asombroso. Cuesta calcular con la QCD porque los quarks interactúan, o se "acoplan", fuertemente. Pero los monopolos interaccionan débilmente y calcular con ellos es fácil. Gracias a la dualidad, pues, los teóricos podrían manejar los monopolos y saber en consecuencia todas las respuestas de la QCD. "Es una especie de truco de magia", dice Harvey. "Desconocemos todavía por qué funciona." Armados con la dualidad, Seiberg y Witten se pusieron a calcular con gran detalle por qué no se observan nunca quarks libres en la naturaleza, y verificaron así un mecanismo propuesto en los años setenta por 't Hooft y Stanley Mandelstam, de la Universidad de California en Berkeley.

Obvio es señalarlo, la validez de todos estos trabajos descansa en el supuesto de la existencia de la supersimetría. Con todo, Seiberg abriga la esperanza de que, en última instancia, la dualidad prevalecerá aun cuando la supersimetría esté ausente, de forma que "los resultados cualitativos serán ciertos a pesar de que los cuantitativos dependan de la supersimetría".

La dualidad, sin embargo, es mucho más que una herramienta de cálculo: es una nueva manera de mirar el mundo. "Algo que se creía compuesto pasa a convertirse en fundamental", indica Harvey. Y viceversa. Ni siquiera Seiberg, conservador por lo usual, se resiste a conjeturar que quizá los quarks sean solitones, los duales de otras partículas genuinamente elementales que sean aún menores.

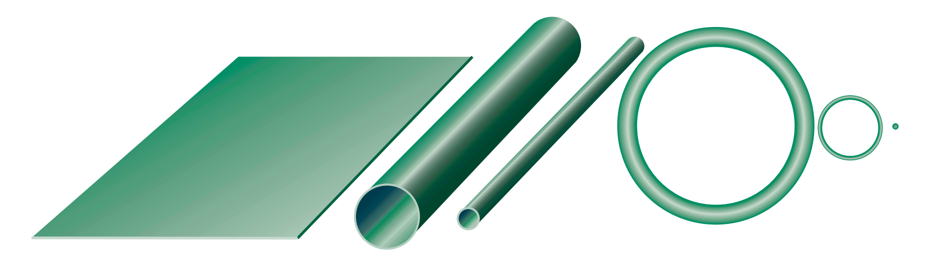
El concepto de dualidad habrá salido de las teorías de campo, pero, como observa Sen, "la dualidad es mucho más natural en teorías de cuerdas". Más versátil, también. La dualidad puede unir cuerdas de tipos diferentes, existentes en dimensiones diferentes y en espacio-tiempos de morfologías diferentes. Gracias a estos logros, la teoría de cuerdas está superando sus limitaciones y elevándose a la categoría de TOE.

En las fases precoces de su evolución, la teoría de cuerdas había fallado en su afán por devenir teoría unificada debido a los muchos tipos de cuerdas que se proponían y la embarazosa multiplicidad de respuestas que daba. Esta abundancia tiene su fuente en otra peculiaridad de la teoría de cuerdas: sólo es coherente si las cuerdas habitan originalmente un espacio-tiempo de 10 dimensiones. El mundo real posee cuatro, tres espaciales y una temporal. Se supone que las seis dimensiones extra se enrollan tan cerradamente, que los objetos grandes, como los seres humanos, no las detectan; la verdad es que ni siquiera los quarks. "Piénsese en una manguera de jardín", sugiere Brian R. Greene, de la Universidad de Cornell. "De lejos parece unidimensional, como una línea. Si uno se acerca, ve que en realidad es una superficie bidimensional, con una dimensión enrollada y muy cerrada."

Por desgracia para los teóricos de las cuerdas, las seis dimensiones extra se pueden enrollar de múltiples maneras diferentes: "Fuentes oficiales calculan que hay decenas de miles", comenta con ironía Strominger. Cada uno de esos espacios comprimidos ofrece una solución diferente para la teoría de cuerdas, con una imagen propia del mundo tetradimensional; no es eso precisamente lo que uno esperaría de una TOE.

Un tipo de dualidad, la simetría especular, encontrada a finales de los años ochenta ha ayudado a aminorar el problema mediante la fusión de algunas soluciones alternativas. La simetría especular descubrió que las cuerdas de dos espacios enrollados y diferentes ofrecen a veces las mismas partículas. Por ejemplo, si una dimensión se hace muy pequeña, una cuerda que la circunde —como una goma elástica ceñiría una manguera— podría crear las mismas partículas que una cuerda que se mueva en torno a una dimensión "gruesa".

El tamaño al que se encoge una dimensión es bastante similar, en la teoría de cuerdas, a otro parámetro: la intensidad con que interaccionan las partículas. En 1990 Ana María Font, Luis E. Ibáñez, Dieter Lüst y Fernando Quevedo, que colaboraban en el CERN, sugirieron que algo parecido a la simetría especular existía también para las intensidades de acoplamiento. Así como los espacios grandes pueden tener la misma física que los pequeños, quizás una teoría de cuerdas con un acoplamiento grande podría dar los mismos resultados que otra que tenga uno pequeño.



4. SE PUEDEN REDUCIR LAS DIMENSIONES de un espacio empalmando sus bordes y encogiéndolo. Por ejemplo, una lámina bidimensional de goma se enrolla primero en forma de cilindro, y luego se encoge la dimensión enrollada. Cuando es lo bastante delgado, el cilindro parece una línea (unidimensional). Doblando esta "manguera" y pegando sus cabos se consigue una rosquilla. Se puede encoger su radio hasta que sea tan pequeño que se aproxime a un punto, un espacio de cero dimensiones. Estos cambios podrían explicar por qué las dimensiones extra del espacio-tiempo que, según dice la teoría de cuerdas, han de existir, son demasiado pequeñas para que se las pueda detectar.

Esta conjetura relacionaba las teorías de cuerdas de manera análoga a como la dualidad actuaba en la teoría de campos. Además, de lejos, las cuerdas parecen partículas; de ahí que la dualidad en la teoría de cuerdas comporte la dualidad en la teoría de campos, y viceversa. Cada vez que se ha puesto a prueba la dualidad en uno y otro caso, la ha pasado brillantemente y ha servido para acercar más los dos dominios.

Mientras tanto, la dualidad emergía en un terreno del todo diferente: la supergravedad. Con esta teoría unificada se pretendía generalizar la gravedad de Einstein para que abarcara la supersimetría. (La teoría de cuerdas, por contra, intentó modificar la teoría de partículas para que incluyese la gravedad.) En 1986,

Duff, entonces en el Colegio Imperial de Londres, consiguió deducir un orden de cosas supergravitatorio en el que intervenían las vibraciones de una entidad fundamental inédita: una burbuja. Mientras que las cuerdas serpentean en 10 dimensiones, esa burbuja flotaba en 11.

"La comunidad de las cuerdas no se interesó ni lo más mínimo", recuerda Duff. Verosímilmente, nadie sabía cómo calcular con la burbuja. Pese a ello, él siguió trabajando en diversas teorías relacionadas con membranas cerradas. Halló que una membrana pentadimensional, o "pentabrana", que se movía en un espacio de diez dimensiones podía ser otra descripción de la teoría de cuerdas.

La pentabrana podía envolver un espacio interno enrollado, como la tripa el embutido. Pero si ese espacio interno se encogía hasta anularse, la burbuja terminaba por parecer una cuerda. Duff sugirió que esta cuerda retorcida era, en realidad, lo mismo que las existentes en la teoría de cuerdas; planteó así la dualidad "cuerda-cuerda". Al mismo tiempo, Christopher M. Hull, del Colegio Queen Mary and Westfield, y Paul K. Townsend, de la Universidad de Cambridge, hicieron hipótesis acerca de muchas generalizaciones de la dualidad en la teoría de cuerdas. "Ninguno de los grupos prestó mucha atención al artículo del otro", dice Duff, con brillo en los ojos.

Edad media



El nuevo auge de la teoría de cuerdas es único en un respecto: la edad de los involucrados. Los físicos, como las modelos, tienden a creer que a los veinticinco años han dado lo que podían dar de sí mismos. "Suele afirmarse que las matemáticas y la física son disciplinas de hombres jóvenes", observa Michael J. Duff, de la Universidad A&M de Texas. Pero, a diferencia de los cabecillas de las revoluciones que les precedieron, esta nueva ola de la teoría de partículas la gobiernan físicos de treinta y muchos o cuarenta y pocos años.

Una razón podría ser la larga serie de materias, además de la teoría de cuerdas, que los investigadores han de saber al dedillo: teoría de campos, supersimetría, gravedad, solitones y topología. "Es difícil que los jóvenes dominen todos esos temas en poco tiempo y puedan aportar algo", expone Jeffrey A. Harvey, de la Universidad de Chicago. La mayoría de los promotores de esta resurrección son los que auparon a un primer plano la teoría de cuerdas en la década de los ochenta, y ahora son diez años más viejos.

Consiguieron sus plazas universitarias hace también diez años. Muy pocos de los alumnos que se formaron por entonces en la teoría de cuerdas se han abierto paso en el sistema. "Se le había dado demasiada publicidad a la especialidad y hubo un bajón", explica Duff. Además, la financiación de la ciencia cayó





Es decir, hasta marzo de 1995. Los acontecimientos se precipitaron en un congreso celebrado en la Universidad del Sur de California. Witten dio la conferencia de apertura. Reunió los indicios de la dualidad procedentes de distintos dominios. Explicó que Hull, Townsend y Duff hablaban de lo mismo y conjeturó que las burbujas de Duff en 11 dimensiones eran los solitones de una cuerda en 10. Tras Witten, habló Seiberg. "Natty [Seyberg] se quedó boquiabierto con la conferencia de Witten", se ríe John H. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California. "Empezó su exposición diciendo 'debería hacerme camionero'." Pero Seiberg también presentó muchos resultados nuevos, lo que movió a Schwarz —uno de los fundadores de la teoría de cuerdas— a iniciar su disertación con mayor humildad: "Me montaré en un triciclo."

A esto siguió una actividad frenética, que no ha remitido desde entonces. Cada día, los científicos acceden a la biblioteca electrónica de borradores del Laboratorio Nacional de Los Alamos y hallan una decena de nuevos artículos sobre el tema. "Es lo primero que se hace por la mañana", señala Anna Ceresole, de la Politécnica de Turín. "Como quien abre el periódico." Aparecen curiosos y dispersos indicios de la dualidad que relacionan las cuerdas y las burbujas con solitones de todos los tipos y formas.

Cierto solitón, parecido a una oruga peluda, con flechas de vector que apuntan afuera a lo largo de una línea, ha resultado ser dual de una cuerda fundamental. (Se parece también a una cuerda cósmica, moda cosmológica que puso Witten en circulación hace diez años.) Se ha revelado también la dualidad de diferentes tipos de cuerdas estrujadas hasta caber en el mundo real —de cuatro dimensiones. "Esas cosas suceden por razones diferentes, pero casan", comenta Seiberg. "Parece magia."

En esta loca caza de dualidades no se trabaja sin método. "Muchas teorías de cuerdas no son realistas", apunta Sen. "Hemos de conocerlas bien todas para hallar la verdadera." La dualidad sirve para conectar y, por tanto, reducir el número de opciones. Witten cree que las cinco teorías de cuerdas basadas en las diez dimensiones que ahora prevalecen serán, al final, reflejos de una cuerda cuántica definitiva, suprema.

Duff ha llegado incluso a proponer una "dualidad de dualidades": podría resultar que la dualidad entre

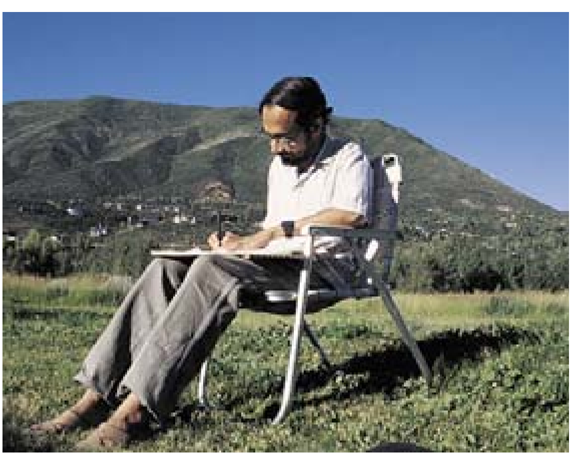
vertiginosamente, lo que cerró las puertas de las instituciones a la mayoría de los físicos jóvenes. Quienes resistieron, hubieron de sufrir una presión tremenda para publicar. Eso lastra la creatividad. “Los jóvenes no pueden valerse por sí solos durante unos años”, cuenta Harvey. “Si no hacen algo que le interese a alguien, no pueden conseguir otro trabajo.” Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, está de acuerdo: “El sistema posdoctoral deja poco tiempo para la reflexión.” No hubo remesas importantes de nuevos alumnos: nadie le veía un futuro a la disciplina.

Al propio tiempo, parecía que otra generación —la de los viejos y famosos— había sido sacada de la escena. Sidney R. Coleman, de la Universidad de Harvard, por ejemplo, declinó comentar los nuevos desarrollos. “A mi edad se suelen decir muchas tonterías”, protestó. “No quisiera hacerlo.” Su colega de Harvard, Sheldon L. Glashow, cuyas puyas todavía irritan a algunos teóricos de las cuerdas, no se había enterado en absoluto de que hubiese cambiado algo.

Susskind, que a sus 55 años cae entre las dos generaciones, adopta un punto de vista optimista acerca de este derrocamiento: “Es una buena señal que haya una generación a punto de hacer mutis por el foro. Significa que la disciplina avanza en direcciones que los viejos no pueden seguir.” Pero se queja de que los que tienen cuarenta años, aunque son, sin duda, brillantes, resulten demasiado anodinos para ser interesantes. La verdad es que los equilibrados asistentes, muy educados, al seminario de Aspen, Colorado (*fotografías*), parecen situarse en los antípodas de los arrogantes y excéntricos genios de ayer, de los que Richard P. Feynman fue ejemplo arquetípico.

Pero cuando los jóvenes brillantes de una generación nueva aparezcan, predice Nathan Seiberg, de la Universidad de Rutgers, “nos tendrán que empujar fuera. Tomarán el mando”. Cambie lo que cambie, parece que la fe en la magia de la juventud está destinada a que nadie la ponga en entredicho.





espacios, y entre objetos elementales y compuestos, estuviese conectada. Entre las predicciones más peculiares de estas ideas se cuenta la de que el tamaño de un espacio enrollado influye en la intensidad con la que interaccionan las partículas, y viceversa. Por tanto, si una dimensión interna es grande, el acoplamiento entre las partículas debería serlo también.

Además, explica Susskind, “a medida que se va de un sitio a otro, el tamaño de la dimensión interna podría variar”. Si una dimensión enrollada se dilata, en algún rincón remoto del universo, el espacio-tiempo adquiere una nueva, quinta dimensión. Donde se aprieta estrechamente, como en nuestro entorno inmediato, aparecen efectos cuánticos. Y la escala fundamental asociada a la teoría cuántica, la constante de Planck, está unida íntimamente con la dualidad: relaciona, por ejemplo, la masa de una partícula o cuerda con la de su dual. “Esta es la razón más convincente para creer que la teoría de cuerdas podría enseñarnos a conocer mejor la mecánica cuántica”, comenta Stephen H. Shenker, de Rutgers.

“De pronto, las dimensiones cambian, las dimensiones de los objetos fundamentales cambian, se enrollan, todo vale”, Duff mueve, maravillado, la cabeza. Una sugerencia más, de Townsend, es una especie de “democracia”: las membranas que aparecen como solitones de la teoría de cuerdas podrían ser objetos fundamentales, de la misma categoría que las cuerdas. Se trata de una idea que no ha calado todavía entre los físicos norteamericanos, para quienes los cálculos con membranas carecen todavía de sentido. Lo apostilla Cumrun Vafa, de la Universidad de Harvard: “Es como andar merodeando sin rumbo. Nunca se sabe.”

Por si esto fuese poco, en abril de 1995 surgió una conexión entre las cuerdas y los agujeros negros que prometía superar el segundo mayor inconveniente de la teoría de cuerdas. Strominger, Greene y David R. Morrison, de la Universidad de Duke, hallaron que los agujeros negros sirven para tramar, en una red compleja, quizá miles de las decenas de miles de soluciones de la teoría de cuerdas. Las conexiones hacen que el problema de encontrar la solución “correcta” de la teoría de cuerdas —la que describa nuestro universo— sea bastante más fácil.

En cierto sentido, los agujeros negros han estado siempre rondando la linde de la teoría de cuerdas. Si llega a acumularse masa suficiente en un lugar, se derrumbará sobre sí misma en virtud de su propio empuje gravitatorio, hasta que se forme un agujero negro. Pero como propuso Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, un agujero negro —que normalmente lo absorbe todo, hasta la luz— podría también emitir partículas, con lo que perdería masa poco a poco y se iría encogiendo. Si la masa original estuviese compuesta por cuerdas, la degradación de la misma terminaría en un objeto de tamaño nulo: un agujero negro “extremo”, que de hecho sería muy similar a una partícula.

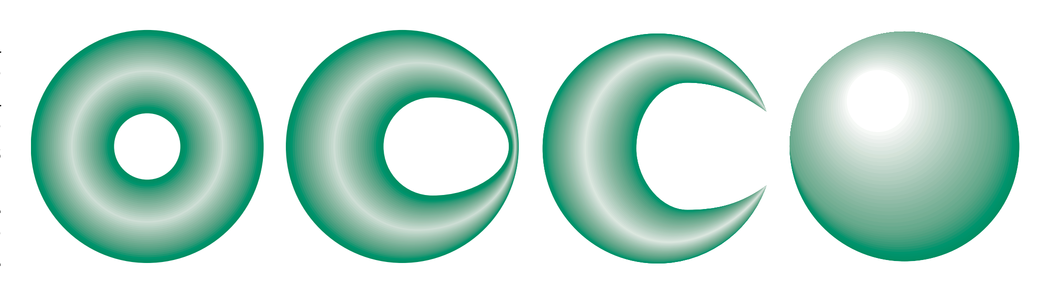
Susskind alega que esos agujeros negros minúsculos no se parecen nada a las estrellas colapsadas que buscan los astrofísicos. “Es un gran trabajo el de Andy [Strominger], pero denominar a esas cosas agujeros negros es, me parece a mí, un poco querer llamar la atención.” (El último artículo del propio Susskind se titula “El mundo como holograma.”) En realidad, los agujeros negros extremos —o burbujas negras u hojas negras— son, simplemente, amasijos de campos de cuerdas, por otro nombre solitones.

Strominger investigaba el comportamiento de los agujeros negros extremos cuando se enrolla una dimensión del espacio-tiempo muy cerradamente. Imagínese que se agarra una manguera infinitamente larga, se la dobla y se pegan los cabos de forma que parezca una rosquilla (sin

Las matemáticas de la dualidad

Gracias a la intuición, las analogías y una rama de las matemáticas que discurre a su aire, e inspirada en la naturaleza, los físicos han resuelto algunos problemas que desde hacía tiempo incomodaron a las matemáticas clásicas. Están además abriendo una nueva disciplina, la geometría cuántica. "Los físicos nos están diciendo dónde debemos mirar", señala John Morgan, matemático de la Universidad de Columbia. "Es frustrante. No podemos acceder como ellos a este tipo de pensamiento."

En 1990 Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, recibió la medalla Fields —el Nobel de las matemáticas— por la multitud de formas en que se había servido de la física teórica para desentrañar dificultades matemáticas. Resultó que un concepto clave de la física, la supersimetría, guardaba íntima conexión con la geometría moderna. "Es muy sorprendente", comenta David R. Morrison, de la Universidad de Duke. El último triunfo de la supersimetría es un medio para clasificar los espacios tetradimensionales. Estas dimensiones, las que pertenecen al mundo real, son también las más complejas.



CREIASE QUE LA ELIMINACION DE LOS AGUJEROS de los espacios cerrados constituía algo imposible en las matemáticas, pero los físicos han encontrado una manera de hacerlo. La rosquilla y la esfera son dos formas de enrollar una superficie bidimensional, pero se diferencian por el número de agujeros que contienen. (La rosquilla tiene uno; la esfera, ninguno.) Pero si se adelgaza parte de la rosquilla hasta reducirla a un punto, cabe separar el resto. Se puede entonces remodelar la rosquilla y convertirla en una esfera.

Simon K. Donaldson, de la Universidad de Oxford, había enseñado en 1982 a usar las teorías cuánticas de campo para contar el número de agujeros de un espacio tetradimensional y, por tanto, clasificarlo topológicamente. (Por ejemplo, una esfera, una rosquilla y un lazo en ocho pertenecen a categorías diferentes de superficies bidimensionales porque contienen un número distinto de agujeros.) Mas por culpa de la naturaleza indomeñable de las teorías de campos los cálculos eran horrendos. En 1994 Nathan Seiberg, de la Universidad de Rutgers, y Witten apuntaron que los resultados de una teoría de campos cuántica supersimétrica podrían obtenerse gracias a otra, mediante una simetría llamada dualidad. De esa forma, bastaría con unos cálculos fáciles para obtener los resultados de otros muy difíciles. Witten proporcionó un conjunto equivalente de números que se podían calcular casi cien veces más deprisa que los "números de Donaldson". "Gracias a la teoría de Seiberg-Witten se ha podido acceder a ese campo y responder la mayoría de las cuestiones más importantes", dice Morgan.

Una dualidad de un tipo diferente, la simetría especular, ha iluminado otro problema muy discutido. Los matemáticos quieren saber cuántas curvas de una complejidad dada se pueden dibujar en un espacio concreto. El problema reviste particular dificultad cuando se trata de curvas intrincadas. Pero Brian R. Greene, de la Universidad de Cornell, y Ronen Plesser, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, hallaron que hay curvas que, habitando dos espacios sin relación manifiesta, ofrecen, sin embargo, los mismos resultados. Por medio de esta simetría especular, Philip Candelas, de la Universidad de Texas en Austin, y otros pudieron dar los resultados de cálculos virtualmente imposibles en un espacio fijándose en el especular, y derivando así los números tan buscados.

En realidad, la teoría de cuerdas ofrece muchas más ideas de las que puede asimilar la matemática clásica. Las contribuciones que suelen citarse se limitan a las que se producen cuando a las cuerdas se las despoja de la mecánica cuántica. Las cuerdas cuánticas ondulan en una multitud de espacios que los matemáticos tienen todavía que construir. Además, Greene, Morrison y Andrew Strominger, de la Universidad de California en Santa Bárbara, han mostrado que los efectos cuánticos hacen posible que los espacios con un número diferente de agujeros —como una rosquilla y una esfera— se transformen lisamente unos en otros, algo rigurosamente prohibido para los matemáticos. (Las reglas corrientes del manejo de espacios permiten estirarlos o comprimirlos, pero no se pueden abrir o cerrar agujeros en ellos.) El estudio de estos espacios se está convirtiendo en la flamante especialidad de la geometría cuántica.

Estos hallazgos han rejuvenecido las venerables disciplinas de la geometría algebraica y de la teoría de números. "Estos son temas centrales de la matemática", afirma Shing-Tung Yau, de la Universidad de Harvard (premiado también con la medalla Fields). "Si abres en ellos un campo nuevo, no esperarás sino influir mucho en el resto de las matemáticas." Un gran obstáculo es que los matemáticos no han probado a su satisfacción los resultados procedentes de la teoría de cuerdas.

Pero los matemáticos aceptan que los físicos, con sus métodos cuestionables, están alcanzando verdades matemáticas. "No podemos liberarnos del rigor, o la disciplina se descompondrá", explica Morgan. Pero el rigor puede ser también un lastre, que impida a los matemáticos dar con fe ciega los pasos que alegremente dan los físicos. "¿Vamos a esperar que los físicos nos digan otra vez dónde mirar?", pregunta. "¿O llegaremos a un estado donde accedamos a esa intuición?"

límites todavía). De esta manera se pueden encoger las dos dimensiones de la superficie de la manguera y crear un espacio mucho menor. Supóngase ahora que la rosquilla se vuelve muy delgada en un punto. Strominger encontró que, a medida que adelgaza, algunos agujeros negros, hechos de membranas envueltas alrededor de la dimensión contraída, llegaban a carecer de masa. Decidió incluir estos objetos en sus cálculos, como ondas mecanocuánticas.

Pasaron dos cosas milagrosas. Hasta entonces los cálculos de la teoría de cuerdas fallaban cuando la manguera se adelgazaba hasta convertirse en una línea, pero los agujeros negros mecanocuánticos hicieron que las matemáticas funcionasen bien, incluso en ese caso extremo. La verdadera salvadora es la física cuántica, explica Horowitz: "En la física clásica, un electrón que caiga dentro de la carga puntual de un protón te da infinitos. Sólo cuando añades la mecánica cuántica ves que el electrón entra en órbita." Otra consecuencia era que aparecía un número enorme de agujeros negros sin masa: el sistema sufría una transición de fase, de manera muy parecida a como el vapor se condensa en agua.

La transición de fase reflejaba un cambio en la propia rosquilla. Se rompía en la parte más delgada —violencia ante la que los físicos y los matemáticos siempre han retrocedido— y se remodelaba convirtiéndose en una esfera, otra forma de enrollar una hoja bidimensional. En la teoría de cuerdas, pues, se conectaban dos tipos de espacios enrollados muy diferentes. "A los matemáticos no les gusta porque hay una rotura", reconoce Strominger. "Pero los efectos cuánticos la suavizan."

Diferentes tipos de roturas podrían acabar por relacionar miles de soluciones de la teoría de cuerdas. Con los espacios internos enlazados así, las cuerdas pueden dar con el "especial" moviéndose de unos a otros. Tal y como el agua se congela en el Artico y se evapora en el Sahara, las cuerdas escogen una configuración adecuada a su entorno. Obtener la solución correcta deviene entonces un problema dinámico.

En alguna parte del universo, imagina Strominger, podría haber una gotita donde las cuerdas encuentren un espacio interno diferente. Al entrar en la gotita, los agujeros negros se convertirían en cuerdas. Y las cuerdas en agujeros negros. En nuestras cercanías más inmediatas, esas gotitas aparecerían fugazmente, como universos virtuales, que existirían durante fracciones microscópicas de tiempo y morirían antes de que fuesen perceptibles.

A pesar de estos vuelos de la fantasía, los físicos ponen los pies en el suelo a tiempo de avisar que la teoría final está todavía lejos. Hasta el optimista Vafa, que se ha jugado con Witten un helado a que la teoría de cuerdas se habrá resuelto a finales de siglo, cree que harán falta décadas para que se la comprenda bien. "Para cuando encontremos una formulación hermosa, ya no se llamará teoría de cuerdas", reflexiona Schwarz. "Puede que la llamemos simplemente 'la teoría'." (Las pretensiones de dar con la teoría del todo se ridiculizaron tanto en los años ochenta que los defensores de las cuerdas se muestran ahora alérgicos a ese mote.)

No todos están convencidos de que la teoría del todo espere a la vuelta de la esquina. "Viniendo del clan de la teoría de cuerdas, las noticias van, como siempre, cargadas de exageraciones", replica ácidamente 't Hooft. Un problema inmenso es que quizá no haya nunca una contrastación experimental de las cuerdas. Nadie puede ni siquiera concebir una contrastación de algo tan ínfimo: el equipamiento moderno no puede sondear nada que sea menor de 10^{-16} centímetros. Los teóricos esperan que, cuando el Gran Colisionador de Hadrones del CERN empiece a funcionar en 2005, se descubra, por lo menos, la supersimetría. "Será una de las formas más encantadoras que la naturaleza haya escogido para ser amable", dice Witten (recordando la fe de Einstein en que Dios no es malévolo).

Aun cuando llegue la supersimetría a manifestarse, seguirá en pie otro problema tenaz. En el mundo real, el espacio-tiempo de cuatro dimensiones que nos es familiar es plano; el tipo de supersimetría imperfecta que los físicos atribuyen a la naturaleza, sin embargo, hace que el espacio-tiempo se enrolle de manera imposiblemente cerrada en todas las dimensiones.

Witten tiene su propia triquiñuela para librarse de este callejón sin salida. Se basa en la dualidad entre teorías de diferentes dimensiones. Quizá se pueda empezar con un universo donde sólo sean al principio planas tres de las dimensiones, y una de las cuatro que conocemos esté todavía enrollada. Un espacio-tiempo así tiene unas propiedades, peculiares aunque agradables, gracias a las cuales se pueden determinar los problemas que presenta la supersimetría. Al final, se podría inducir a la cuarta dimensión a expandirse y llegar a un mundo como el que conocemos. "La sugerencia de Witten es bastante descabellada", dice sonriendo Schwarz, "pero a lo mejor tiene razón".

Las peculiaridades de la gravedad suscitan también muchas preguntas difíciles. Einstein halló que la gravedad surge de la curvatura del espacio-tiempo. Pero cuantizar la gravedad es cuantizar el espacio y el tiempo. En ese caso, sostiene Horowitz, "puede que el espacio y el tiempo no tengan significado, y puede que emerjan en forma de alguna estructura aproximada a grandes distancias".

La teoría de cuerdas está muy lejos de cumplir estas expectativas. Además, la teoría del todo tendrá que ser capaz de describir las circunstancias más extremas, como la génesis del universo o el entorno dentro de un agujero negro. "Los teóricos de las cuerdas tienden a confiar en su teoría ciegamente, y sostienen que puede abordar lo que sea", afirma 't Hooft de forma concluyente. "La verdad es que no explican el colapso gravitatorio mejor que los demás. En absoluto."

Pero a los teóricos de cuerdas, deslumbrados por el resplandor de la riqueza matemática a su alcance, no parece que los arredre crítica alguna. Pierre M. Ramond, de la Universidad de Florida, intenta explicarlo: "Es como si uno vagase por el valle encantado de un rey, empujase una roca y encontrase una escalera fantástica. No hemos hecho más que rozar los escalones." No se sabe dónde llevan. La aventura es así aún más apasionante.

La tarde cae en Aspen. Mientras los rayos del sol crepuscular encienden los troncos y las hojas de los árboles de un amarillo claro, los físicos siguen una discusión que empezaron a mediodía. Esta vez es sobre la función de onda del universo, un intento directo de describirlo como un objeto mecanocuántico. "Personalmente, en mi terca, poco instruida, ignorante opinión, creo que es un montón de chatarra", se desahoga Susskind. Horowitz, uno de los que han construido funciones de onda así, se ríe con ganas. Empieza a refrescar, y las peculiares farolas brillan más en la oscuridad creciente. Pero parece que los físicos no tienen prisa por retirarse.

Telefonía

Sistemas de acceso sin hilos

Al pensar en las inversiones realizadas por las compañías telefónicas, siempre imaginamos las grandes antenas para comunicaciones por satélite o largos tendidos de fibra óptica. Sin embargo, la verdadera inversión se concentra en el acceso desde la central local hasta el usuario: el bucle de abonado. De hecho, dicha inversión puede multiplicar por diez la recibida por los restantes elementos de la red telefónica.

Tradicionalmente, el bucle de abonado se ha realizado por medio de cables de cobre: cables de pares. Esta solución ha sido la más eficaz desde el punto de vista económico y de rapidez de instalación. Sin embargo, el coste de la misma crece de manera no uniforme con la distancia. A medida que ésta aumenta, los costes se disparan. En realidad, son unos pocos abonados, los que habitan en zonas alejadas, los que obligan a realizar grandes inversiones. Por consiguiente, no es de extrañar que el servicio telefónico se haya extendido mucho más despacio en el mundo rural que en las ciudades.

Puesto que el coste de la conexión vía radio es, hasta cierto punto, independiente de la distancia, las soluciones basadas en radio pasan a ser el candidato natural para facilitar el acceso a abonados remotos. Así, cuando en los años setenta aparecieron los primeros sistemas de acceso por radio modernos, una de sus aplicaciones fue dotar de servicio telefónico a áreas rurales.

Pero el problema económico no es el único factor. La necesidad de suministrar servicios más avanzados que la voz impone mayores requerimientos a la red. Y es, precisamente, en el tramo final donde nos encontramos con el equipamiento más antiguo, dañado y de peor calidad. Gracias a la rapidez de instalación, el coste y la calidad de los enlaces de radio, éstos se pueden convertir, en muchos casos, en primera elección.

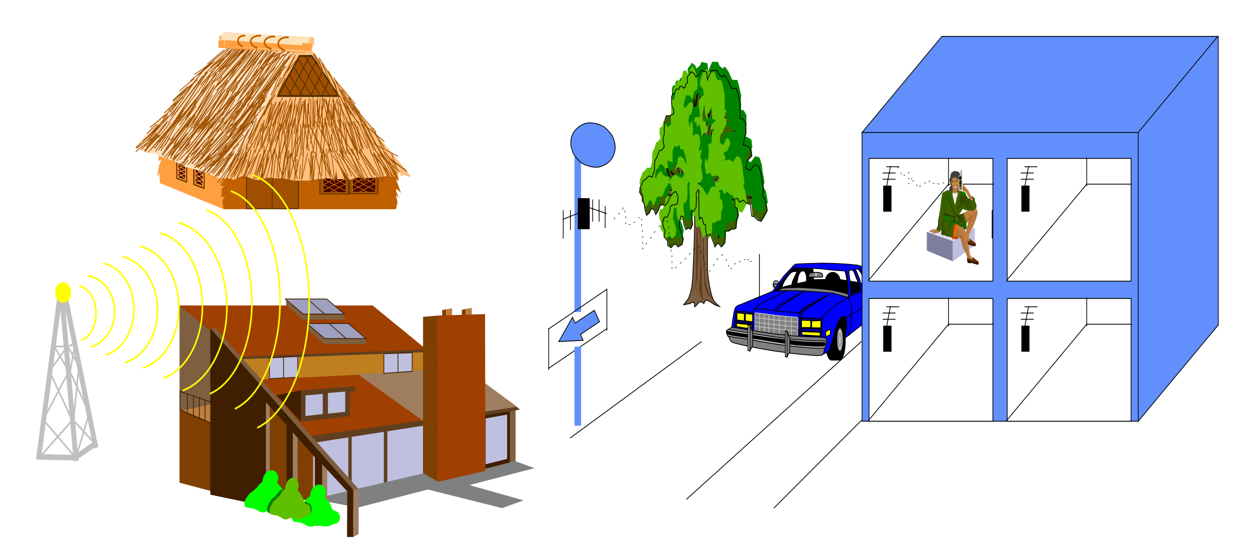
Los requerimientos no son los mismos para todos los usuarios. Una región montañosa, que desea un acceso telefónico básico, tiene necesidades muy diferentes de las de una plataforma petrolífera sobre el mar o de las de una área suburbana, que quiere acceder rápidamente a servicios de banda ancha (datos a alta velocidad). Esta diversidad de situaciones obliga a la existencia de varios sistemas.

Básicamente, las soluciones vía radio pueden dividirse en dos grandes grupos: sistemas que sustituyen el cable de pares y sistemas que aprovechan la movilidad inherente al acceso por radio.

Los sistemas que se limitan a sustituir el cable de pares tienen por misión principal dotar de servicio telefónico áreas remotas o de difícil acceso; se destinan también a regiones donde no hay ningún tipo de infraestructura, como ocurre en los países subdesarrollados. A estas aplicaciones están orientados los sistemas de radio punto a multipunto (como los mencionados) y los sistemas vía satélite.

En los sistemas que pretenden explotar la movilidad inherente al acceso por radio se utilizan sistemas celulares que, en efecto, dividen el área de servicio en células, cada una conectada a una estación de radio, y entre las que puede moverse el usuario. A los celulares pueden añadirse los sistemas sin hilos, en los que el terminal está, en principio, ligado a una sola estación.

En estos momentos, muchas de los soluciones punto a multipunto son adaptaciones de sistemas de telefonía móvil celular, modificados para la provisión de servicio fijo. Su ventaja principal estriba en que pueden compartir parte de las instalaciones e infraestructuras con una red de telefonía móvil ya instalada. Un ejemplo cercano lo tenemos en el sistema ARCE (Acceso Radio Celular). El ARCE posee varios centenares de miles de usuarios en zonas rurales de Galicia y Andalucía. La expansión del sistema de comunicaciones móviles celulares GSM, recientemente



El acceso sin hilos no sólo permite llegar a las áreas rurales o dar servicio a las nuevas urbanizaciones, sino que es el origen de los nuevos sistemas integrados en los que el mismo terminal servirá para recibir todos los servicios

introducido en España y en muchos países europeos, lo convierte en un buen candidato para servir de sostén de la expansión de la red en el futuro. Numerosos fabricantes ya empiezan a disponer de soluciones a muy bajo coste.

Sin embargo, lo natural es que los usuarios que disponen de acceso vía radio también puedan gozar de las ventajas de la movilidad. Aunque la telefonía móvil para todos puede ser una solución a medio plazo, se han desarrollado otros sistemas más económicos, como el DECT (Sistema de telecomunicaciones sin hilos europeo). El DECT consiste en un terminal, similar a los teléfonos sin hilos, que se utiliza en el hogar (como teléfono convencional), en la calle (terminal de cabina telefónica) y en la oficina (extensión de una centralita). Desde el punto de vista técnico, incorpora soluciones que permiten seleccionar, automáticamente y en función de las circunstancias radioeléctricas, los canales disponibles, lo que reduce los problemas de planificación.

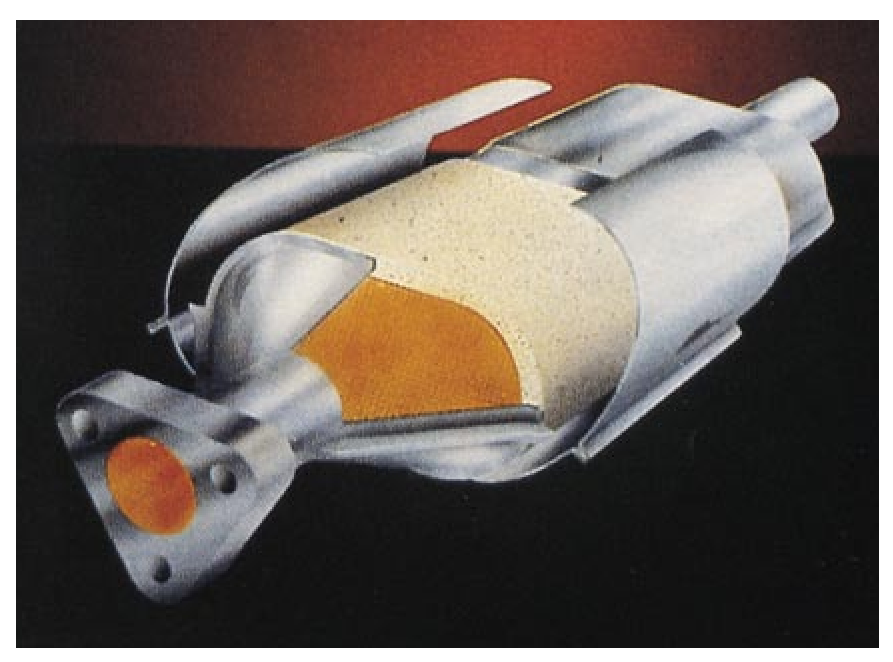
El desarrollo experimentado por el acceso radioeléctrico en los últimos años va a acostumbrar al usuario a la movilidad. De hecho, el impacto final de las comunicaciones móviles es algo imposible de anticipar. Algunas predicciones afirman que más de un 50 por ciento del tráfico telefónico del año 2000 tendrá su origen o destino en un terminal sin hilos o de telefonía móvil. Los terminales se parecerán cada vez más a los ordenadores personales, adoptando formas nuevas, como los APD (auxiliares personales digitales). Además, se espera un gran incremento de la demanda de servicios de datos por radio, desde la mensajería hasta las redes de área local, con nuevas aplicaciones en los campos del ocio y la enseñanza.

JOSÉ JIMÉNEZ DELGADO
Sistemas de Radiocomunicaciones
Telefónica I + D

Contaminación

Emisores

De los gases que salen por el tubo de escape de un coche, más de un 70% en peso es nitrógeno molecular (N_2) y gases nobles que no sufren transformaciones químicas en los diversos procesos que tienen lugar en el ciclo de funcionamiento de un motor alternativo. Cerca de un 20 % es dióxido de carbono y alrededor del 10 % restante, vapor de agua.



Sección de un catalizador

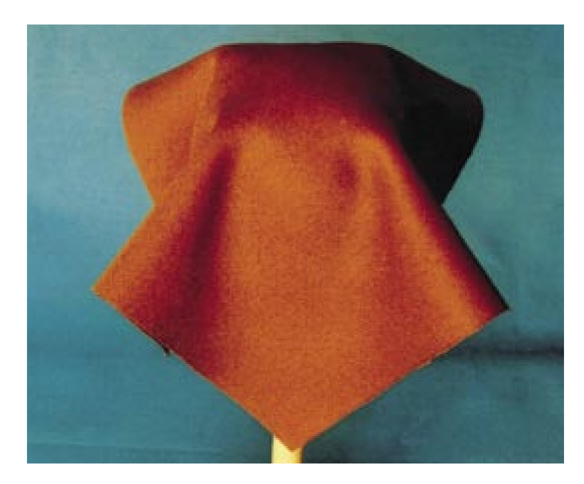
Por el tubo de escape se emiten también contaminantes directamente nocivos, aunque no alcancen el 1 % de la masa total de gas emitida. Son éstos monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos evaporados y parcialmente oxidados, así como anhídridos sulfurosos; a ellos debemos añadir partículas sólidas de hollín.

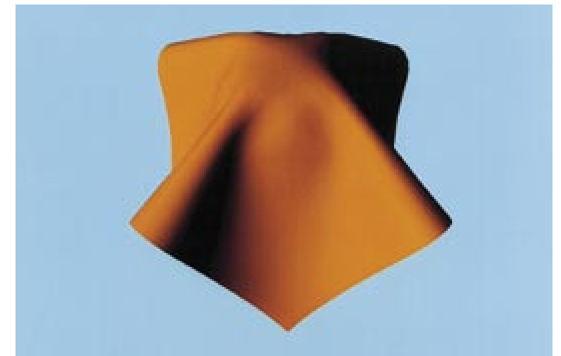
La toxicidad del monóxido de carbono (CO) es muy elevada. En proporciones pequeñas, inferiores al 1 %, presenta efectos letales. Cuando se encuentra diluido, como ocurre por mor del tráfico en las urbes, provoca dolores de cabeza y migrañas. Los óxidos de nitrógeno (No_x), por su parte, se generan en virtud de las altas temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión del motor. Al combinarse con agua forman ácido nítrico, uno de los responsables de las lluvias ácidas que han asolado parte de los bosques de Europa.

Por lo que respecta a los hidrocarburos evaporados y parcialmente oxidados, algunos son cancerígenos; otros causan la niebla fotoquímica (“smog”). Atención especial merecen los compuestos de plomo, utilizados desde mediados de siglo para disminuir la tendencia a la detonación de las gasolinas (incremento del octanaje); encierran un peligro a largo plazo, al irse acumulando paulatinamente en los órganos vitales. No menos dañinos son los anhídridos sulfurosos y las partículas de hollín producidos fundamentalmente por los motores diésel.

Pese a esa amenaza, hemos de reconocer que los niveles de emisiones de los contaminantes enumerados generadas por los automóviles son todavía bajos, de acuerdo con los estándares exigidos por la legislación, progresivamente más restrictiva. La solución usual en los motores de gasolina de cuatro tiempos se basa en la utilización del catalizador, que reduce drásticamente las emisiones contaminantes de CO, NO_x e hidrocarburos. Para su buen funcionamiento, es imprescindible la incorporación de un equipo de inyección electrónica que, en función de las condiciones de funcionamiento (grado de carga, régimen de giro, temperaturas, presión y otros), determina la cantidad de combustible a suministrar en cada instante.

Para conseguir niveles de emisiones todavía más bajos, la solución pasa por el empleo de mezclas pobres, con contenidos en gasolina inferiores a los correspondientes a la mezcla estequiométrica. En los motores de gasolina tal procedimiento supone graves inconvenientes debido a la forma en que tiene lugar el proceso de combustión: mediante la propagación de un frente de llama que debe extenderse a través de una mezcla homogénea de aire y combustible vaporizado. Así, la utilización de mezclas pobres puede significar el apagado de la llama o incluso la imposibilidad de llevar a cabo la ignición, todo lo cual trata de subsanarse con la generación de





Trama y urdimbre por ordenador

Si un vestido o traje sienta mejor en la percha que puesto, no le eche la culpa ni a las hechuras que heredó de sus padres ni a que el fabricante lo pensó para el escaparate. Predecir cómo caerá el tejido incluso sobre una figura esbelta es algo endiabladamente difícil: la urdimbre se estira en un sentido, la trama en otro; en algunos tejidos se aprieta el trenzado de las fibras, en otros se afloja.

El trabajo se puede ahora hacer más fácil —y llegar antes el día en que los modistos puedan idear sus creaciones por ordenador— gracias a un programa desarrollado por Bijian Chen y Muthu Govindaraj, de la Universidad Cornell. Estos dos ingenieros textiles han dado con un método de modelado que, a partir de simples datos sobre la resistencia tensil, textura y cuerpo del tejido, parece adelantar con razonable rapidez y exactitud cómo caerá y se ajustará un paño a una forma.

Aunque los investigadores desarrollaron su programa en el superordenador IBM de Cornell, afirman que opera con igual acierto en telares más accesibles. Pero no se apresure el lector a que le exploren la forma de su cuerpo, a menos que le sobren muchos kilos o tenga un cuerpo canijo. Hasta ahora, el modelo solamente se ha probado con esferas y mesas.

W. Wayt Gibbs

La caída de una pieza de tejido sobre una mesa* (arriba) *se predijo con una aproximación ajustadísima* (abajo) *mediante una técnica de modelado por ordenador

altos niveles de turbulencia en la cámara de combustión y con soluciones complejas, como el recurso a mezclas estratificadas.

En los motores diésel, la emisión de contaminantes está asociada a la producción de óxidos de nitrógeno, dadas las elevadas presiones y temperaturas alcanzadas durante el proceso de combustión, a la generación de óxidos de azufre, en virtud de sus mayores contenidos en los gasóleos, y, sobre todo, a la emisión de hollines resultantes de la deshidrogenación de las cadenas de hidrocarburos en condiciones de funcionamiento, en las que se inyecta demasiado combustible para el poco caudal de aire que circula por el motor.

Para mejorar el rendimiento de los motores diésel se hace hincapié en la utilización de mayores presiones de inyección, en el uso de separadores de partículas, y, de modo específico, en la incorporación de la inyección electrónica; esta última medida encuentra aún graves dificultades para su aplicación debido a las elevadas presiones de inyección que el funcionamiento de estos motores requiere.

Observamos, pues, que en motores de cuatro tiempos las emisiones de contaminantes directamente nocivos están bastante controladas en condiciones de funcionamiento estables, como son las usuales en circulación normal por autovías o autopistas, con régimen de giro y grado de carga constantes. Sin embargo, la respuesta a los procesos transitorios de calentamiento, aceleración y sobre todo variación brusca de condiciones de funcionamiento es mucho más ineficaz. En estas situaciones, muy frecuentes en la circulación habitual, los niveles de emisiones se multiplican y resultan difíciles de controlar. Una vez incorporadas las soluciones técnicas descritas, la calidad del combustible utilizado se muestra uno de los factores decisivos para reducir aún más los niveles de emisiones.

El motor térmico, al quemar hidrocarburos, genera también dióxido de carbono. Parece suficientemente contrastada la responsabilidad de este gas en el calentamiento global del planeta. Para reducir la cantidad de CO_2 producido por un motor térmico es necesario quemar menor cantidad de combustible, por lo que habrá que seguir incrementando el rendimiento del motor. Otras posibles soluciones son la utilización de combustibles sin carbono, esto es, directamente hidrógeno, lo que no resulta nada fácil, o la sustitución del motor térmico por el eléctrico. Los principales fabricantes de automóviles ya poseen alguna versión de vehículo eléctrico, siempre con autonomía limitada. Otros fabricantes han apostado por el motor híbrido, que supone la combinación de un motor eléctrico utilizado en tráfico urbano con otro térmico para grandes distancias.

Rafael Royo Pastor
Universidad Politécnica. Valencia

Jamón serrano

Propiedades organolépticas

El jamón curado constituye uno de los alimentos más representativos de la gastronomía y está considerado como un manjar exquisito en los más prestigiosos restaurantes de todo el mundo.

Existen muchos tipos de jamón curado, que podemos resumir en dos principales: el de cerdo ibérico y el de cerdo blanco. El jamón ibérico cuyo origen es el cerdo ibérico está restringido al suroeste español. Pre-

senta, a su vez, diversos niveles de calidad según el tipo de crianza y alimentación (bellota, recebo, etcétera). La producción de jamones de cerdo blanco se extiende por toda la península. Dentro de este último grupo se encuentra el jamón serrano, que destaca por su largo período de curación, normalmente superior a los nueve meses.

El proceso de curado del jamón serrano consta de varias fases. Una primera de recepción y clasificación de los jamones destinados a la curación. Se procede luego a la salazón, fase ésta que dura de 10 a 12 días, con un promedio de 1,1 días por kilogramo de peso; es el momento en que se adicionan los agentes del curado (sal y otros). En la tercera fase, de postsalado, se invierten de 45-60 días; tiene por misión la distribución homogénea de la sal en todo el jamón. Y llegamos, por último, a la fase de maduración y secado, que puede oscilar entre 9 y 24 meses, durante la cual el jamón desarrolla una textura, color, aroma y sabor característicos como consecuencia de múltiples reacciones químicas y bioquímicas reguladas por la temperatura y humedad de las salas de curado, así como del tiempo total del proceso.



Jamones durante la fase de maduración y secado

La calidad del jamón curado depende también de otros factores. Por ejemplo, y en buena medida, de la genética, es decir, de los tipos de cruces porcinos empleados; las características genéticas determinan numerosas características bioquímicas, como la cantidad y modo de infiltración de la grasa, que es decisiva para una correcta jugosidad. Importa, asimismo, el tipo de alimentación que se le ha dado al cerdo; al tratarse de un animal monogástrico, la composición de la grasa de su tejido adiposo viene afectada por la dieta. De ahí la exquisitez de la alimentación con bellota o los problemas cuando se alimentan con determinados piensos que presentan aromas extraños. Todos estos factores inciden en las propie-

La fuerza del pequeño

En el mundo del astrónomo aficionado abundan cazadores de cometas, fotometristas, buscadores de supernovas, observadores de meteoros y astrofotógrafos. Es proverbial su tenacidad observacional. Pero se encuentran con un obstáculo no pequeño, la contaminación lumínica, originada por el alumbrado público urbano. Los astrónomos profesionales hace tiempo que levantaron sus observatorios en picos de montes alejados para protegerse de tal inconveniente.

Por eso mismo los aficionados reclaman protección para el cielo nocturno, sobre cuyo estado de degradación dio ya la voz de alarma la Unión Astronómica Internacional en los años ochenta. Pero ni siquiera el cierre progresivo de observatorios, como el de monte Wilson, cercano a Los Angeles, parece provocar una justificada inquietud. En España, la expansión urbanística promovida por el desarrollo económico no atendió a los criterios de eficiencia y ahorro en el consumo energético, lo que ha comportado un deterioro acelerado de la calidad de nuestros cielos. Pero quizás estemos todavía a tiempo de invertir la tendencia.

La Sociedad Astronómica de Figueras (SAF), ciudad del noreste peninsular, decidió hace dos años iniciar por su cuenta una lucha contra la contaminación lumínica de su entorno. No se ha conformado con eso. Al anunciar el Ministerio de Obras Públicas una futura ley de protección del medio ambiente atmosférico, cuya redacción se encuentra paralizada actualmente, estableció contactos con el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), surgiendo la propuesta de realizar una campaña con el fin de introducir en la futura ley el concepto de contaminación lumínica. Posteriormente, se adhirieron a la misma la Sociedad Española de Astronomía (SEA) y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA). La preparación de dicha campaña comportó la recopilación de información técnica, proporcionada por la oficina para la protección de la calidad del cielo del IAC, y la redacción de un informe, realizada por la SAF.

Estas acciones y otras paralelas pueden hallar un aliado inesperado: la recesión económica que obliga a muchos municipios y particulares a no derrochar energía eléctrica. La combinación de ambos factores está haciendo posible algo que tan sólo cinco años atrás era inimaginable: salvar las estrellas para todos.

PERE HORTS FONT
Sociedad Astronómica de Figueras



Contaminación lumínica de Los Angeles, vista desde el monte Wilson

dades organolépticas (color, aroma, sabor, etcétera) y, por tanto, en la calidad final del jamón.

El desarrollo del aroma y sabor característicos del jamón serrano es muy complejo. Intervienen numerosas reacciones que son, fundamentalmente, de tipo enzimático y químico. Las reacciones enzimáticas son las propias del metabolismo biológico: proteolisis, lipolisis y en menor medida la glucolisis y transformación de nucleótidos. Entre las reacciones químicas, destacan las reacciones de Maillard, oxidación, deshidratación, descarboxilación y descomposición térmica. Ambos tipos de reacciones ocurren de forma simultánea y mayoritariamente durante la fase de maduración y secado. Además, tienen mayor o menor preponderancia según las condiciones concretas del proceso (temperatura y humedad). El resultado final es la generación de compuestos volátiles aromáticos y de numerosos compuestos solubles responsables del sabor, tales como péptidos, aminoácidos libres y otros, identificados mediante técnicas cromatográficas y electroforéticas.

La utilización de equipos de cromatografía de gases con detectores de masas y de ionización química, previa extracción o separación, ha permitido ya identificar más de 80 componentes volátiles en el aroma del jamón curado. Estos compuestos se pueden agrupar en las siguientes categorías: carbonilos (aldehídos y cetonas), furanos, ácidos grasos, pirazinas y compuestos azufrados (sulfuros, tiazoles, tioles y tiofenos). Unos, como los carbonilos, tienen mayor participación por sus características aromáticas. Otros, como los alcanos, carecen de olor. El aroma final viene determinado por el conjunto de los componentes volátiles.

La terneza y color del jamón curado son otras características sensoriales muy apreciadas. La mayor o menor terneza guarda relación directa con la estructura muscular, es decir, con las proteínas miofibrilares que forman parte integral de la estructura de la fibra muscular y el colágeno. Cuanto más proteolizadas se encuentren, más tierna es la carne o producto cárnico. Así, por ejemplo, el jamón de Parma es mucho más tierno y blando que el español precisamente porque ha experimentado una mayor proteolisis durante el proceso de fabricación. El grado de secado influye también en la terneza: será más duro cuanto más seco.

Por lo que concierne al color, tiene éste que ver con la mioglobina, el pigmento natural de la carne. La mioglobina experimenta una desnaturalización parcial. Se da un aumento relativo importante de la forma oxidada metamioglobina, aunque la presencia de nitritos favorece la formación de nitrosomioglobina, en un 20-40 % del total de mioglobina, responsable del característico color rojo-rosáceo.

Según acabamos de ver, son muchos los factores que convergen en el desarrollo de las características sensoriales del jamón. Gran parte de las investigaciones actuales están dirigidas a una mejor comprensión de la química y la bioquímica del proceso completo al objeto de realizar una mejor selección genética, optimizar las condiciones de fabricación y obtener la máxima calidad final con el mínimo coste.

FIDEL TOLDRÁ VILARDELL
Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos. CSIC
Burjasot (Valencia)

Ritmos biológicos

Y sus implicaciones farmacológicas

La mayoría de las funciones de los seres vivos están sujetas a cambios periódicos o cíclicos, que son de naturaleza endógena, es decir, obedecen a mecanismos internos del organismo y no dependen del ambiente.

Esta ritmicidad endógena constituye un rasgo característico de células, tejidos, órganos y sistemas. El período y fase de los distintos ritmos están coordinados por marcapasos localizados en diferentes niveles de organización biológica. Pero los ritmos pueden también estar sincronizados por señales externas periódicas, de las que son muestra los ciclos luz-oscuridad. En humanos, la alternancia actividad-descanso es un poderoso sincronizador de los ritmos endógenos. A este tipo de señales se les denomina marcadores de tiempo ("Zeitgeber"), y, aunque no establecen el ritmo, suministran el dato cronológico sincronizador.

Existen ritmos endógenos circadianos (con período de unas 24 horas), ultradianos (con períodos inferiores a 24 horas), e infradianos (con períodos de más de 24 horas). Muchas veces, los métodos de investigación, diagnóstico y terapéutica fracasan por no tomar en consideración estas variaciones periódicas del estado biológico del individuo. ¿Y qué pautas, por contra, deberían seguirse?

En primer lugar, las mediciones tendrían que realizarse en determinados intervalos de tiempo. Hay que tener en cuenta que la frecuencia de muestreo influye en los resultados, ya que a medida que disminuye se va perdiendo resolución en la captación de fluctuaciones circadianas y ultradianas. La precisión es aún menor con el empleo de muestras integradas, como en el caso de la orina, que implica el manejo de una muestra única; las muestras de plasma dan un resultado más exacto en cuanto a la determinación de un ritmo. Además, sería conveniente aumentar la frecuencia de muestreo cuando se esperan fluctuaciones rápidas de sus valores, como es el caso en humanos, de las tomas nocturnas para el cortisol, al anochecer para la temperatura, primeras horas del sueño para la hormona del crecimiento (GH), etc.

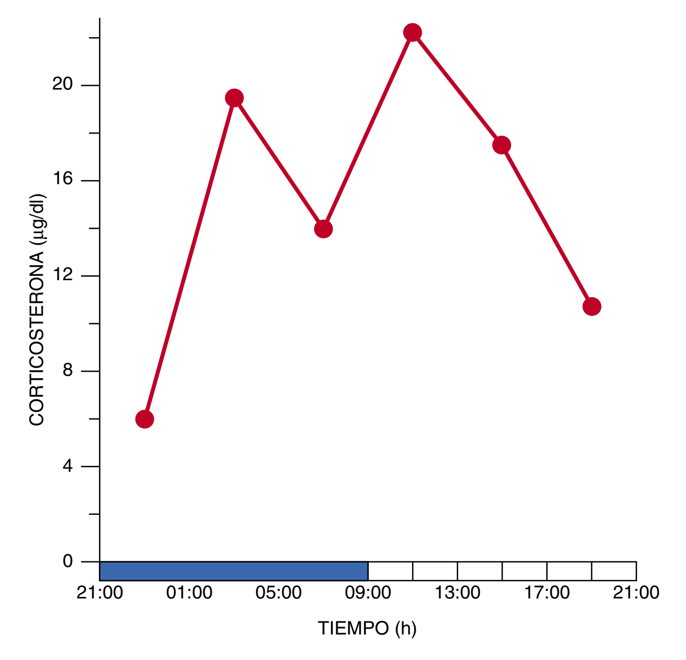
Para un muestreo transversal ideal habría que conseguir que los individuos estuviesen en fase (sincronizados), y analizar las perturbaciones del entorno que enmascaran las medidas reales, modificando el ritmo del parámetro considerado. Entre estas condiciones ambientales cabe citar la iluminación (duración del período de luz, intensidad lumínica), disponibilidad de alimentos (en tiempo o en cantidad), dietas diferentes, temperatura, estímulos sociales (información auditiva, olfatoria o táctil), drogas (anestésicos, estradiol, benzodiacepinas, Li, etc.). Todos estos factores modifican los ritmos de buena parte de los parámetros bioquímicos, fisiológicos y de comportamiento.

Un ejemplo ilustrativo, sería el ritmo de temperatura corporal, que en humanos presenta un máximo al final de la tarde y un mínimo en las primeras horas de la mañana. Un baño caliente a cualquier hora del día o noche altera dicho ritmo.

En lo concerniente a la administración de fármacos, hay que tener en cuenta que los efectos que ejercen sobre los organismos y la influencia sobre sus ritmos biológicos dependen de las horas de administración y de su distribución en el tiempo. Esta variabilidad temporal de los efectos de una sustancia sobre los organismos se debe a la combinación de factores rítmicos; nos referimos a los ritmos diarios en los procesos de absorción, influenciados por los ritmos de *p*H gastrointestinal, secreciones digestivas, circulación y permeabilidad de las membranas celulares. A esto habría que añadir los cambios diarios en la capacidad de transporte de las sustancias en el plasma. También presentan ritmos diarios el metabolismo hepático (actividad enzimática, flujo hepático) y la depuración renal (velocidad de filtración, *p*H urinario). Por lo tanto, aunque la administración de una sustancia tenga lugar a velocidad constante, ello no implica el mantenimiento de una concentracion constante de dicha sustancia en plasma.

Finalmente, la sensibilidad de un organismo a una sustancia cambia de forma horaria independientemente de los niveles de la misma en plasma. Así, por ejemplo, la administración de pentobarbital sódico (35 mg/Kg) en la rata tiene su menor efecto anestésico al principio de la mañana y su efecto más prolongado al caer la tarde. Lo mismo ocurre con la respuesta al ACTH de glándulas adrenales en ratas, siendo máxima al principio de la fase de luz. La administración de un corticoide a una hora próxima al pico circadiano de cortisol plasmático altera poco la actividad adrenal, mientras que la misma dosis administrada 12 horas antes o más tarde tiene un fuerte efecto inhibitorio. Se ha comprobado que los ritmos circadianos de susceptibilidad persisten en ambientes constantes, pero pueden estar condicionados por la manipulación de sincronizadores (el cambio de fase de un sincronizador conlleva cambio de fase de la susceptibilidad a algunas sustancias).

Estas consideraciones implican la necesidad de una programación temporal de acuerdo con los ritmos biológicos en la administración de fármacos.



Incrementos en las concentraciones de corticosterona plasmática de ratas tras la administración subcutánea de ACTH (0,5 Ul/kg) a diferentes horas del ciclo luz-oscuridad. La barra azul horizontal representa el período de oscuridad. (Velasco, A. y col. Datos no publicados)

ANA MARÍA VELASCO
Y MARÍA TERESA
GONZÁLEZ-GRANDA
Depto. Biología Funcional
Universidad de Oviedo

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

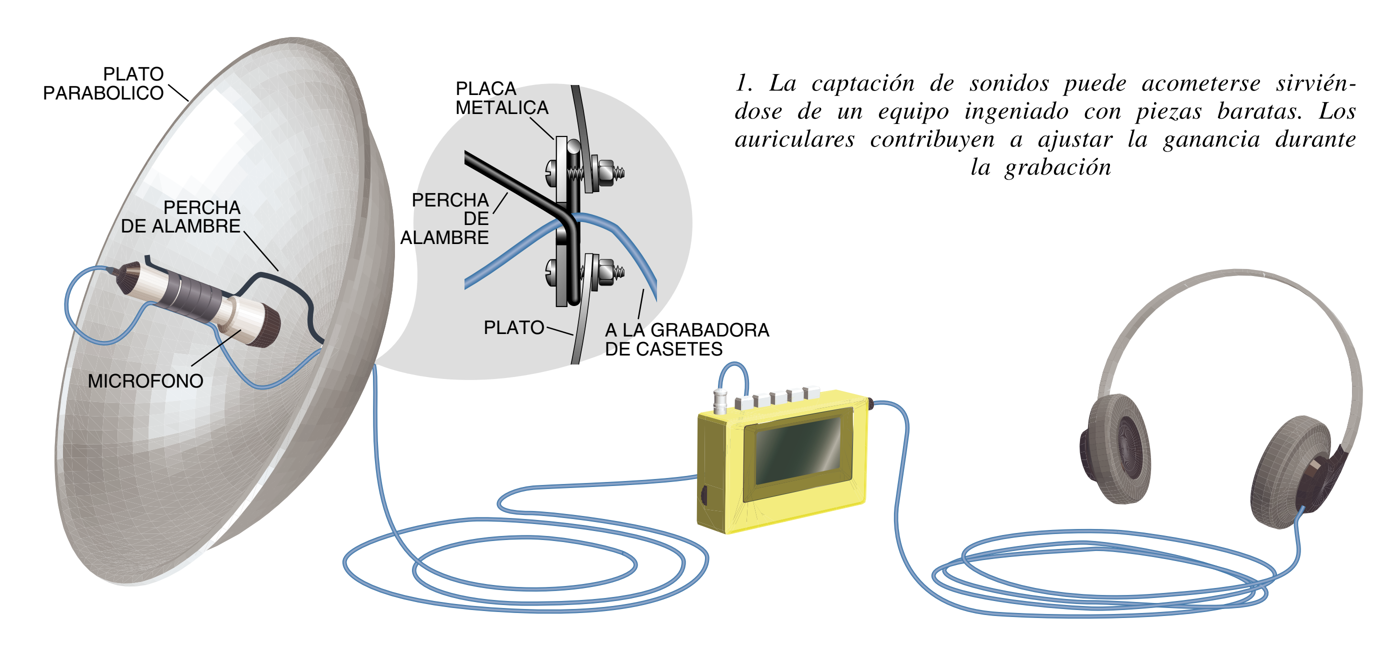
Grabación de los sonidos de la naturaleza

La evolución es el más exquisito de los compositores; o si no, quédese un rato en un playa solitaria y afine el oído. Con el viento y las olas, con las voces de las gaviotas, la naturaleza dirige un concierto más grandioso y agradable que cualquiera de los que se interpretan en las salas de conciertos. Pero ese concierto no acaba a orillas del mar. En toda la superficie terrestre puede que se den diez millones de sonidos únicos generados por pájaros, anfibios, mamíferos e insectos. No obstante su atractivo sobre nuestro espíritu, sólo hay del orden del uno por ciento de esas rapsodias naturales adecuadamente grabadas y archivadas. Muchas menos son las estudiadas sistemáticamente. Con un poco de cuidado, podrá el lector captar sonidos hasta ahora nunca grabados y analizar su estructura.

Podría incluso contribuir con ellos a los fondos de las fonotecas de los museos de ciencias naturales. En Estados Unidos, la Biblioteca de Sonidos Naturales del Laboratorio de Ornitología de Cornell alberga la mayor colección del mundo de voces de la naturaleza. La fonoteca contiene los cantos de más de la mitad de todas las especies de aves, por no mencionar chirridos de insectos, croares de anfibios y balidos de mamíferos. Contribuir a instituciones de ese tenor requiere por supuesto instrumentos de altas prestaciones, cuyo precio puede ascender a cientos de miles de pesetas. Por fortuna para el aficionado, hay descubrimientos que pueden resultar más baratos. Con ayuda de un programa preparado a tal efecto, el lector puede hacer investigaciones originales sirviéndose de un sistema de grabación modesto.

Antes de ponerse a recoger datos, hemos de aprender a reconocer a los animales por su canto característico. Familiarícese con algunas guías de campo, hable con naturalistas e, importantísimo, escuche grabaciones. Aunque no todos podamos estudiar los sonidos de la naturaleza en la biblioteca de Cornell, sí podemos recurrir a las colecciones de sonidos de la naturaleza grabadas en disco compacto. *The Guide To Bird Sounds* de la National Geographic Society es el complemento sonoro a su guía de campo en papel impreso, *Aves cantoras* de Chris Harbard, y las *Peterson Field Guides* ofrecen los cantos de muchísimas aves, así como la *Guía sonora de las aves de España*, de Alosa. Si el lector dispone de un reproductor de CD-ROM, déle una pasada a *Bird Song Master*, que le ayudará a ejercitarse en la identificación de los cantos de las aves empleando su ordenador. Los amantes de las ranas pueden probar con *Voices of the Night*, una producción del laboratorio de Cornell que se inmiscuye en los males de amor de los anfibios. Para la adquisición de esos productos, consulte a su librero o a cualquier departamento de zoología universitario.

La grabación eficaz de sonidos de la naturaleza requiere que seamos capaces de aislar un sonido concreto y eliminar todos los demás. Esta operación la realiza perfectamente un disco parabólico. Un micrófono colocado en su foco captará sólo los sonidos que viajen paralelos a su centro. El disco, no obstante, deberá ser lo bastante reducido para que podamos transportarlo fácilmente por el campo, lo cual nos impone un diámetro máximo de un metro, más o menos. Para que se refleje en el disco, la onda sonora debe ajustarse al mismo. Por desgracia, ello supone que no amplificará longitudes de onda superiores a un metro; es decir, la frecuencia más



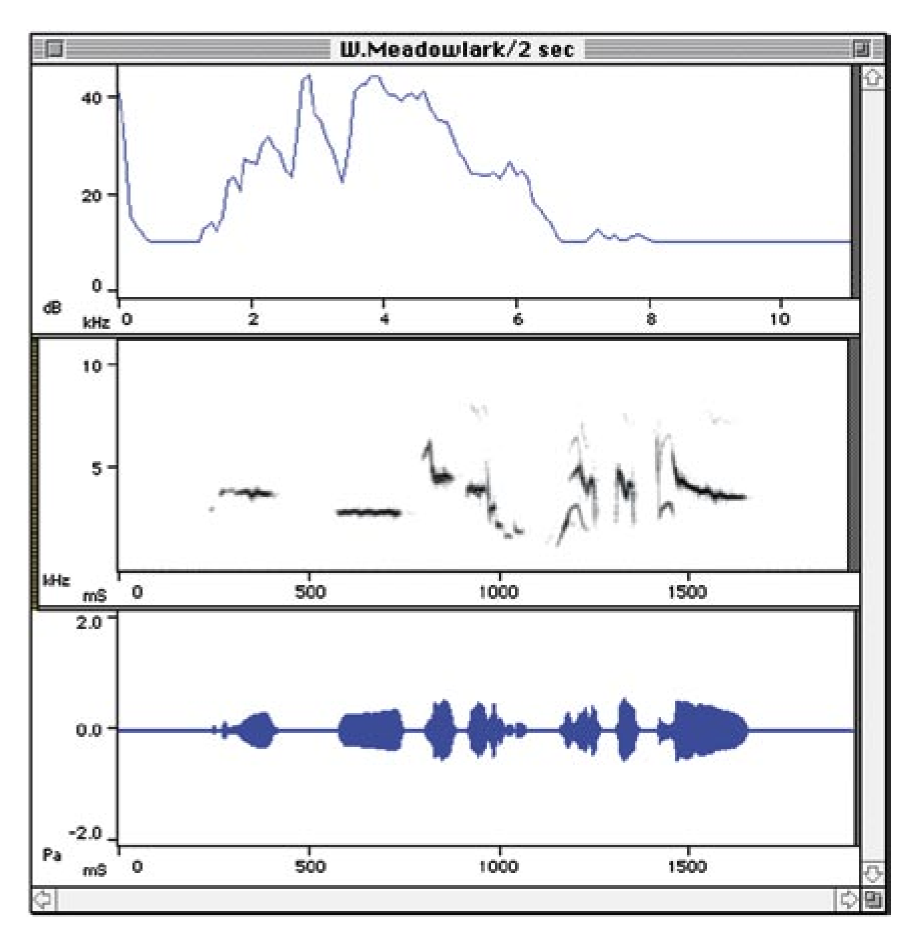
1. La captación de sonidos puede acometerse sirviéndose de un equipo ingeniado con piezas baratas. Los auriculares contribuyen a ajustar la ganancia durante la grabación

baja que un disco como el nuestro es capaz de amplificar es de 344 hertz (aproximadamente de fa mayor a do). Por suerte, los sonidos que producen la mayoría de los animales están por encima de los 344 hertz; los cantos de las aves se encuentran entre 2000 y 6000 hertz.

Los reflectores parabólicos pueden adquirirse en los comercios del ramo audiovisual; yo he trabajado con un reflector de aluminio pulimentado de 45 cm. Los platos de radio son también parabólicos; tampoco cuesta encontrar en esas mismas tiendas algunos con la medida adecuada. Y recuerde que cualquier plato aproximadamente parabólico le brindará determinada amplificación y direccionalidad (algunas piezas y los cuencos para ensalada resultan sorprendentemente buenos). El aficionado puede incluso experimentar con paraguas bien tensados, deslizaderas de plástico para nieve, pantallas de lámparas caseras y hasta el fondo de una parrilla de barbacoa.

Una vez que disponga de un amplificador parabólico, el aficionado necesitará un micrófono, una grabadora magnetofónica y unos auriculares. En la base del plato parabólico taladre un orificio de la anchura suficiente para admitir el hilo conductor del micrófono. Para soporte de éste puede valerse de una percha de alambre metálico rígido. Enrolle un extremo de éste en la base del plato y atornille una placa metálica encima, de tal modo que el alambre de la percha quede sujeto a la base del plato (*véase figura 1*). Con cinta aislante sujete el extremo libre de la percha al micrófono, el cual debe quedar enfrentado al plato. La mejor posición del micrófono tendrá que determinarla experimentalmente. Conecte el cable de salida del micrófono a una grabadora de casetes portátil. No necesita proveerse de un equipo electrónico de lujo; podrá aprender muchas cosas acechando animales con un micrófono y una grabadora modestas.

Para adquirir práctica en las condiciones de grabación reales, ejercítese en un zoo. Allí, amén de abundar, los sonidos animales se hallan confinados en zonas reducidas. Cuenta, además, con la posibilidad de resolver sin dificultad los contratiempos que le presente el equipo. Una vez en el campo, percátese bien de lo que pasa detrás del blanco elegido. Al igual que un teleobjetivo, un micrófono parabólico comprime la distancia entre el primer plano y el plano de fondo. Así, los ruidos procedentes de allende el blanco sonarán más fuertes en las grabaciones que al natural. Por eso, colóquese apuntando bien por encima o bien por debajo del blanco; de ese modo, como plano de fondo obtendrá sólo el silencio del firmamento o de la tierra.



2. El canto de la alondra de la pradera del oeste puede observarse de tres modos con el programa Canary: la cantidad de energía que el ave emite a cada frecuencia de su canto (arriba), *la variación de la frecuencia con el tiempo* (centro) *y la variación de la intensidad sonora (medida en pascals, unidad de presión) con el tiempo* (abajo)

Hasta hace pocos años la disección de los sonidos estaba reservada a los profesionales. Hoy disponemos de programas. Canary, un programa para MacIntosh diseñado en el Laboratorio Ornitológico de Cornell, es ideal para estudiar voces naturales. Permite ver al instante la construcción de cada tono (*véase figura 2*). Canary deja a cero en cualquier fragmento de la melodía y lo analiza en detalle. El programa permite, asimismo, disimular las faltas cometidas en el terreno y borrar sonidos indeseados, tales como el distante rodar de un camión.

Pero la potencia del programa Canary reside en su capacidad para comparar sonidos diferentes. Para ello los comprueba matemáticamente al objeto de establecer sus similitudes. Si los sonidos son iguales, el resultado es 1; si son completamente diferentes, el resultado es 0. El programa hace deslizar una melodía al lado de la otra y las compara. Seguidamente representa en el gráfico correspondiente los números, de tal manera que puede observarse la diferencia.

Esta característica del programa posibilita toda suerte de exploraciones. Puede medirse la diferencia entre dos cantos consecutivos de un mismo pájaro, comparar el canto de un ave con el de otra de la misma especie y poner a prueba las propias ideas acerca de las notas emitidas por especies estrechamente emparentadas. Con una pizca de ingenio, puede el lector medir los retardos entre los instantes en que el sonido llega a cada uno de tres micrófonos muy separados entre sí y determinar entonces la posición del pájaro cuando emitió su canto. (El sonido se propaga a unos 344 metros por segundo y llega antes al micrófono más cercano al animal.) Podría el lector reunir los distintos movimientos de un pájaro y establecer los límites de su territorio. O bien tratar de levantar un mapa con las pautas de búsqueda que un murciélago, valiéndose de su sonar, desarrolla

durante la caza. Las posibilidades son infinitas. Considerada la potencia de Canary, resultan una ganga las 40.000 pesetas que viene a costar.

Si su ordenador funciona con Windows o DOS, considere Wave for Windows, Beach, Sound Forge o Software Alectorio Workshop. El inconveniente es que esos programas se concibieron para técnicos en sonido y no para científicos, por lo que carecen de algunas de las características más útiles de Canary. Me inclino por Wave. Este posee toda la potencia necesaria para ver el sonido y decodificar sus frecuencias. Aunque los músicos puede que disfruten de las características de los competidores de Wave, los científicos no apreciarán tanta diferencia. Estos paquetes están disponibles en los buenos catálogos de programas.

Si su ánimo es contribuir con datos originales a las fonotecas de los museos de ciencias naturales que las posean, necesitará un equipo profesional. Pero un buen micrófono le saldrá por 125.000 pesetas y las grabadoras de alta calidad están en torno al medio millón. ¿Qué puede hacer un aficionado? Un procedimiento es encontrar otras personas interesadas en el tema y hacer un fondo común. Contacte con organizaciones naturalistas de su localidad o envíe un mensaje al boletín electrónico de Internet (pruebe con el punto de encuentro, "site", de intercambio y reunión de la página Web de la Sociedad de Científicos Aficionados). Y no se olvide de los estudios de sonido y colegas locales; podrían resultar entusiastas de la naturaleza que ya estuvieran rondando por entre el equipo que el lector necesita. A los fabricantes de audio y mayoristas les agrada a veces hacer donación de equipos anticuados pero en perfecto estado de funcionamiento.

Para más información acerca de la grabación de sonidos naturales, contacte con Cornell Laboratory of Ornithology, 159 Sapsucker Woods Road, Ithaca, NY 14850; e-mail: libnatsouns@cornell.edu o http://www.ornithcornell.edu/birdlab.hmyl; teléfono: (607)254-2404. Le ofrecerán también datos interesantes los servicios de parques y espacios protegidos de su respectiva comunidad autónoma.

SHAWN CARLSON es profesor de física en la Universidad estatal de San Diego.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

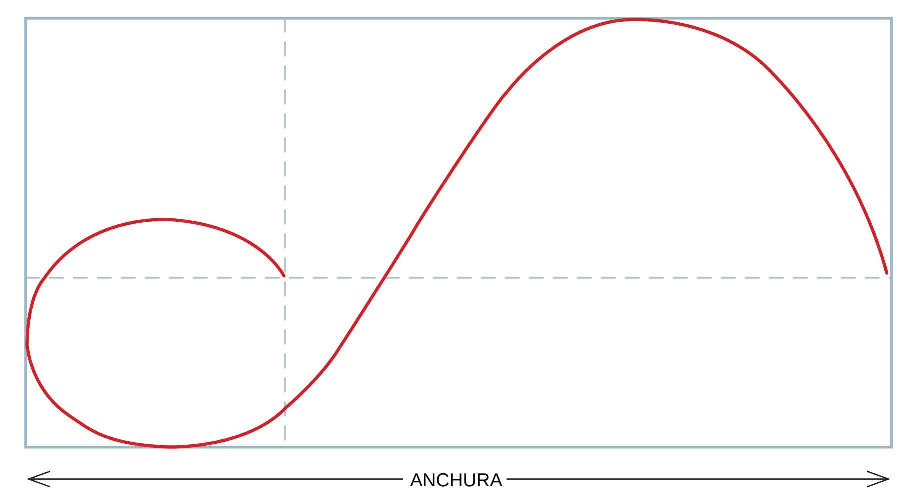
La manta de Mamá Gusano

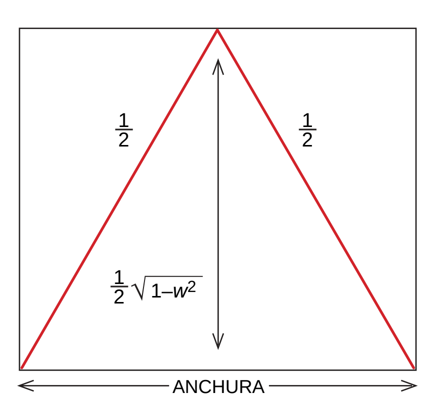
El problema de la manta de Mamá Gusano plantea cuál es la región bidimensional mínima capaz de recubrir cualquier curva de longitud igual a uno. Aunque el nombre parezca un despropósito, imaginemos, sin embargo, que la región es una manta y que la curva es un gusanito dormido. Su mamá necesita lo que podríamos llamar “una manta universal”, para poder cubrir a Gusanillo, cualquiera que sea la postura que éste adopte. Hace varios decenios, Leo Moser, matemático de la Universidad de Alberta, proponía una cuestión desconcertante y, por ahora, pendiente de solución: ¿qué forma tiene la manta universal de área mínima?

Una solución evidente al problema general es un disco circular de radio unidad, cuya área es π, o sea, aproximadamente, 3,141. Si la cabeza de Gusanillo descansa en el centro del círculo, su cola se encontrará, como máximo, a la distancia de una unidad de medida. En 1973, C. J. Gerriets y George D. Poole, de la Universidad estatal de Emporia, describieron una manta pentagonal cuya superficie era de sólo 0,286. Nadie había logrado dar con otra más pequeña hasta que, hace unos meses, David Reynolds, de la compañía Credence Systems, de Beaverton, en Oregón, me envió la demostración de que cierta manta de cuatro lados, y una superficie de $(4+\sqrt{3})/24$, vale decir, de un valor en torno a 0,239, es universal. En este campo de las matemáticas, el resultado de Reynolds es impresionante. Ciertas variantes de su método podrían conducir a cobertores todavía menores. Las posibles soluciones merecerán comentario en “Acuse de recibo”, pero, por favor, han de venir acompañadas de una demostración —o de sólidas pruebas experimentales— de que la forma propuesta es universal.

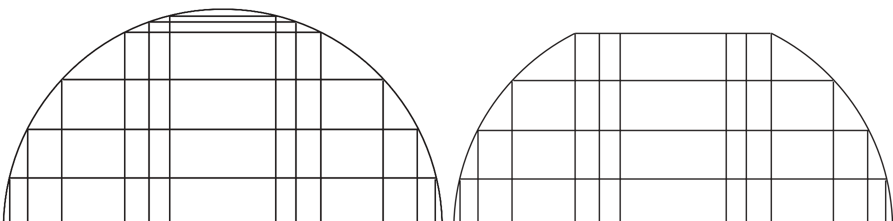
Para explicar el método de Reynolds empezaré por utilizarlo para demostrar que un semicírculo de diámetro unidad es universal. Tal pieza tiene un área de π/8, o sea, aproximadamente 0,392. Dada una postura de Gusanillo, tracemos una recta que una la cabeza con la cola. (Si se hubiera hecho un ovillo, se traza una recta cualquiera que cruce sobre su cuerpo.) Determinemos ahora el rectángulo mínimo que contenga al gusanito; dos de los lados de este rectángulo deben ser paralelos a la primera recta dibujada [*véase la figura 1*]. Tal rectángulo será llamado “franja”. La anchura de la franja, *w*, está comprendida entre 0 y 1. A partir de *w* podemos acotar la altura, pues la franja habrá de tener altura máxima en el caso de que Gusanillo se quede dormido formando un triángulo isósceles. Dicha altura tiene un valor de ½ $\sqrt{(1-w^2)}$.

Así pues, hemos identificado una familia de franjas, una para cada valor de *w*, que son “colectivamente” universales. Con independencia de cómo se acurruque el gusanito, puede quedar cubierto con al menos una de las franjas de esta familia. Podemos construir una manta universal por superposición de estas franjas. Reynolds da a esta construcción el nombre de “centón para gusanitos”, aunque en realidad tiene más de aplique o superpuesto

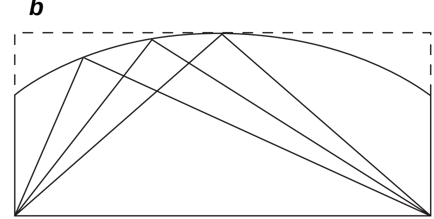


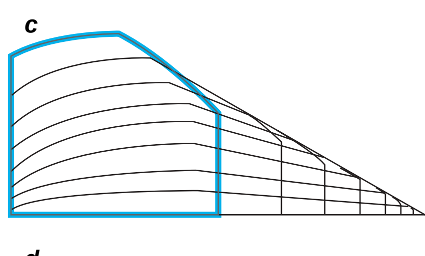


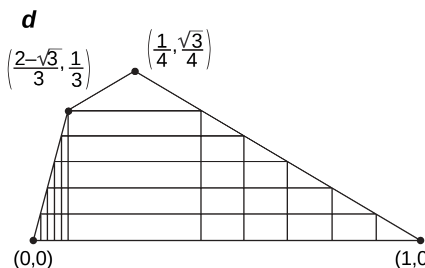
1. Franjas rectangulares que recubren una curva cualquiera de longitud unidad (arriba). *La franja más alta es necesaria cuando la curva corresponde a los dos lados de un triángulo isósceles* (izquierda). *La familia entera de tales franjas se puede disponer de forma que llenen un semicírculo* (centro). *Recortando la parte superior se consigue una manta universal aún más pequeña* (derecha)



2. Mantas pequeñas (a) *construidas mediante franjas con un lado elíptico* (b). *Se logran nuevas reducciones teniendo en cuenta cómo podría moverse Gusanillo por debajo de la manta* (c). *La manta mínima conocida tiene un área de 0,239* (d)







d

$\left(\frac{2-\sqrt{3}}{3}, \frac{1}{3}\right)$ $\left(\frac{1}{4}, \frac{\sqrt{3}}{4}\right)$

(0,0) (1,0)

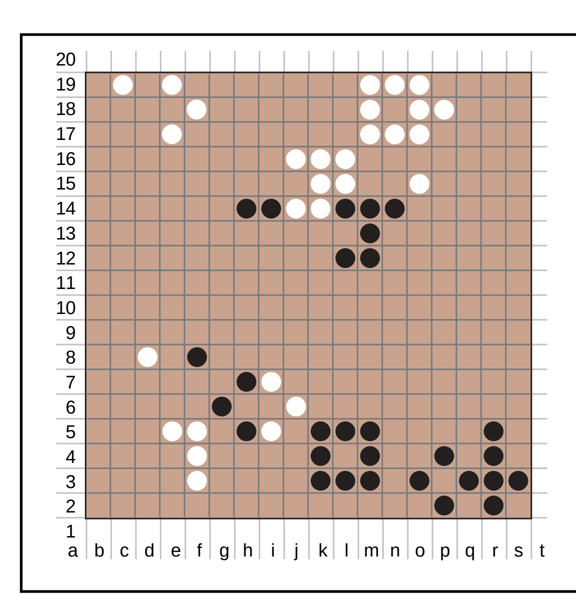
que de centón, pues no es necesario que los bordes estén cosidos a tope; de hecho, cuanto más se traslapen, mejor. Con cualquier disposición de las franjas la región recubierta será decididamente universal. Para ver por qué, imaginemos al gusanito acurrucado ya. Determinemos qué pieza del centón le cubre. El centón está formado por esa franja y por material adicional; puede, pues, colocarse de manera que la franja seleccionada tape a Gusanillo.

La tarea siguiente consiste en superponer los retales buscando el centón menor posible. Colocándolos simétricamente, con las bases alineadas, recubren un semicírculo de diámetro unidad. El semicírculo, pues, es universal, como se había prometido. Pero no hay razón especial para optar por esta disposición. Ni es forzoso que las franjas sean rectangulares. Ni tampoco hace falta la gama completa de anchuras, de 0 a 1, utilizadas arriba. Cuando la anchura w es igual a $\sqrt{5}/5$, la franja es cuadrada. A cualquier franja de altura mayor que $\sqrt{5}/5$ se la puede girar 90 grados, con lo cual su altura será menor que $\sqrt{5}/5$. Eliminando estas franjas del aplique semicircular podemos recortar una tira en lo alto, reduciendo así el área sin perder la universalidad.

Mediante un razonamiento un poco más complicado, que requiere girar al propio gusanito, Reynolds concluye que en realidad podemos despreciar todas las franjas cuya anchura w sea menor que 1/2. Además, la altura máxima de la franja sólo hace falta en la parte central; en el resto, la altura está determinada por un arco de elipse. La inclusión de estos refinamientos produce la manta mostrada en la figura 2*a*. A primera vista, parece que se le ha sacado ya a este método todo el partido posible, pero hay que tener en cuenta que a la manta puede dársele la vuelta respecto a un eje vertical. Si Gusanillo se estira hasta alcanzar el contorno elíptico de la franja —a la izquierda del centro, sea por caso— no podrá alcanzar a la vez el borde superior a la derecha del centro. Por tanto, podemos recortar parte del borde superior derecho de cada franja. La superposición de las franjas resultantes crea una manta limitada por un arco de elipse y por tres líneas rectas.

En la construcción de estas franjas hemos dado por supuesto que la cabeza y la cola del gusanito estaban, por así decirlo, clavadas. La porción elíptica del contorno sólo se debía a una de las franjas, a saber, la de anchura 1/2 [*en azul en la figura 2, c*]. Pero cualquier gusano situado en su interior puede moverse hacia el extremo derecho de la manta, donde hay sitio de sobra. Tras considerar unas cuantas formas clave que el gusano puede adoptar, Reynolds muestra que el borde elíptico y el borde vertical izquierdo de nuestra manta anterior pueden reemplazarse por dos líneas rectas. El resultado tiene un área de sólo 0,239, como se dijo más arriba.

Al investigar cuestiones de esta naturaleza, es decir, problemas geométricos de optimización, conviene recordar que podría no haber una solución definitiva. Aun cuando se descubriera un rimero de soluciones, cada una mejor que la precedente, tal sucesión podría no ser convergente. Richard Courant y Herbert E. Robbins ofrecieron un



Acuse de recibo

Varios lectores escribieron señalando un presunto error en la sección de enero de 1995, titulada “Ajedrez en un tablero de go”. Se presentaba allí un juego llamado godrez, y el artículo terminaba proponiendo un problema, en el que las blancas jugaban y daban mate en uno. Con la notación explicada en el artículo, la solución ofrecida era o11-j6. En sus cartas indican que ellos observaron que las negras podían entonces jugar m3-l4, llegando a la posición que vemos a la izquierda. “Las huellas centradas en k7, en j7 o en j8 no permiten ataques diagonales que causen daño al aro negro”, escribía uno de ellos. “Por consiguiente, las negras no han sufrido mate.”

La objeción es correcta. Existen, sin embargo, otras jugadas válidas. La huella centrada en j7 puede bajar un espacio, hasta j6, borrando con ello tanto la piedra blanca de i5 como la piedra negra de k5. Aunque las blancas sacrifican una piedra, consiguen ganar, al averiar el aro negro.

–I. S.

buen ejemplo de lo dicho en una obra clásica, *¿Qué es la matemática?* Se trata de un problema al que llamo “la tienda de campaña de Mamá Mosquito”. El bebé mosquito, al dormir, levanta una patita sobre el suelo plano. Mamá Mosquito tapa a su bebé con una manta que, a la manera de una tienda de campaña, toca al suelo por todo su contorno. ¿Cómo será la tienda de superficie mínima?

Una tienda cónica de base circular sirve al caso, y cuanto menor sea su base, menor será su superficie lateral. De hecho, se pueden hallar tiendas adecuadas cuya superficie lateral sea cualquier número positivo, tan pequeño como se quiera. Pero al intentar optimizar esta sucesión de soluciones se llega a una tienda “óptima” de área cero, lo cual es imposible. Un cono de base cero no constituye una superficie, sino un segmento rectilíneo y, como tal, carece de sentido decir que encierra al bebé mosquito. Por tanto, en el caso de la tienda no existe solución óptima, si nos empeñamos en que la tienda haya de ser una superficie.

De igual forma, no está claro que la manta “gusanera” admita una solución definitiva. Depende, en cierta medida, del tipo de mantas que se consideren. Por ejemplo, todos los gusanitos poligonales de longitud unidad pueden quedar tapados con mantas de superficie igual a cero. Existen muchas mantas de ese tipo, pero la verdad es que consisten básicamente en agujeros; el problema tendría que llamarse la red de Mamá Anguila. Frente a esto, John M. Marstrand, de la Universidad de Bristol, demostró en 1979 que ninguna manta que tenga área nula puede cubrir a todos los gusanos lisos. (Una curva es lisa si tiene tangente en todos sus puntos.) El resultado de Marstrand induce a pensar que la manta de Mamá Gusano sí posee una solución bien definida y, además, interesante, que muy bien pudiera ser la de Reynolds.

Pero los matemáticos aficionados pueden todavía pasar ratos amenos tratando de hallar otras mejores. El problema admite muchas variantes, en su gran mayoría pendientes de solución. ¿Cuál es, por ejemplo, la manta gusanera universal de perímetro mínimo? ¿Y qué decir del saco de dormir de la serpiente, que ha de alojar a una sierpe de longitud unidad, cualquiera que sea la forma en que se arrolle en tres dimensiones? ¿Y si los gusanos morasen en una superficie esférica?

Libros

Agustín Jimeno, Luis Alonso, Javier de Lorenzo y Ramón Margalef

Psiquiatría

Neurodegeneración

ADVANCES IN RESEARCH ON NEURODEGENERATION. Dirigido por Y. Mizuno, D. B. Calne y R. Horowski. Birkhäuser; Basilea, 1994.

Puede aceptarse que las enfermedades infecciosas del sistema nervioso central y buena parte de las determinadas genéticamente están hoy día bastante bien conocidas y en todo caso son objeto extensivo e intensivo de investigación.

En este volumen se recogen las comunicaciones y discusiones del segundo simposium sobre neurodegeneración celebrado en la localidad de Whistler en Canadá en enero de 1993 bajo el patrocinio de la firma Schering A.G. de Berlín. Continúa así los trabajos de la primera reunión de 1991 en la cual se constituyó el "Congreso Anual de Invierno sobre Neurodegeneración" y que se celebró en Austria.

Las contribuciones y discusiones están repartidas en cuatro grupos: factores genéticos, del crecimiento y ambientales; metales y radicales libres; metabolismo energético y neurotoxinas, y aspectos particulares sobre neurodegeneración. George Hyslop en el primer trabajo presenta datos a favor de la existencia de un nuevo gen responsable de la enfermedad de Alzheimer tipo familiar en el cromosoma 14. Estudio meticuloso y laborioso bajo las técnicas estándar de ligadura genético-cromosómica, que parte de la aceptación de un tipo familiar y otro más bien tóxico degenerativo independiente en la enfermedad de Alzheimer. Esta enfermedad y la de Parkinson centran como es sabido la investigación de la patología cerebral en los años actuales por su importancia humana, social y científica.

El segundo trabajo, original de P. McGeer y colaboradores, estudia los factores de crecimiento celular en la enfermedad de Parkinson en vistas a las posibilidades de transplantes eficaces de células vivas como procedimiento terapéutico. Después de reseñar los diversos factores de crecimiento y protección identificados hasta la fecha, se detiene en el factor de crecimiento fibroblástico que es un péptido con propiedades de activación del crecimiento vascular e impulso de la mitogénesis. Estudia así su distribución en el cerebro de rata y en del hombre, encontrando el significativo hallazgo de que determinadas neuronas de la sustancia nigra de los enfermos presentaban inmunopositividad para los factores de crecimiento.

F. Hefti en el trabajo siguiente describe las técnicas de cultivo celular como procedimiento experimental para el estudio de las enfermedades neurodegenerativas. Se utilizan células aisladas "inmortales" y fragmentos de tejidos para la identificación de factores de crecimiento y tóxicos, así como para estudios sobre el envejecimiento espontáneo.

Muy interesante, sobre todo por el impacto en la opinión pública y las frecuentes discusiones en medios de comunicación últimamente, son los trabajos sobre factores de protección para el Parkinson derivados de la exposición al entorno y los estilos de vida. En concreto presenta C. Koller la polémica sobre la posible protección para el Parkinson que ofrecería el hábito de fumar y el consumo moderado de alcohol. A ellos se añaden la infección por el virus del sarampión y el cáncer del adulto. Postula además las características que habría de cumplir un factor tóxico ambiental universal que explicara el aumento —al parecer— de la enfermedad de Parkinson en los últimos años.

En el segundo grupo de trabajos D. B. Calne, C. W Olanow, H. B. Moussa y colaboradores pormenorizan la influencia del manganeso, hierro y óxido nítrico en la enfermedad de Parkinson en particular y en la degeneración neuronal en general. El trabajo de Moussa impresiona por su precisión y también novedad respecto a un ion ampliamente extendido en el organismo e imprescindible para tantas funciones respiratorias y metabólicas como es el hierro. La distinta distribución del Fe en el cerebro del mono joven y adulto, las pautas de metabolismo cerebral del Fe lentas y con escasa difusión a través de la barrera hematoencefálica, señalarían las características del Fe en el tejido nervioso, a diferencia por ejemplo del metabolismo hepático del mismo. La ferrotoxicidad se entiende en complicidad con el ion calcio y la peroxidación de los lípidos y dopamina nigroestriatal, a lo que se dedican los siguientes estudios sobre el ion Ca y el radical NO de J. Hibbs y S. Orrenius.

La tercera parte se abre con una investigación de F. Beal sobre el envejecimiento mitocondrial y la enfermedad de Huntington, que intenta ser imitada en el mono y en la rata. Investiga en todo caso el porqué de la circunstancia conocida del lento progreso de la enfermedad en edades adultas después de su estricta determinación genética. Entre otros se identifica el ácido 3 nitropropiónico como posible tóxico mitocondrial importante en la enfermedad de Huntington. Más tarde se abordan el balance energético, el fallo del ciclo del glutamato y otros en las enfermedades neurodegenerativas, las proteasas celulares, las isoquinolinas, moléculas similares al MPTP endógeno, etc. Gráficos, ciclos metabólicos y algunas microfotografías acompañan la cuidada presentación y selección de estos estudios que muestran una vez más la inmensa complejidad de la neurodegeneración.

En el último grupo de trabajos destacan el de H. Reichmann sobre disfunción mitocondrial de la enfermedad de Parkinson. Encuentra indicios a favor de una disfunción autónoma en este órgano celular, que como es sabido porta su propio genoma; sin embargo los datos no permiten por el momento el diagnóstico de la enfermedad a partir de biopsias musculares o neuronales. Trabajos sobre los factores protectores y tróficos en el Parkinson, la producción espontánea de sustancia amiloide en procesos degenerativos infecciosos y no infecciosos con especial consideración de las enfermedades por virus lentos, y un estudio sobre el síndrome complejo de Guam (esclerosis lateral amiotrófica y Parkinson simultáneamente) completan la obra.

Se trata, pues, de una obra cuidadosamente editada, con trabajos de primera calidad y de fondo y forma similares a los que pueden aparecer en las revistas especializadas, y que permiten, sin embargo, una revisión rápida al interesado, al presentarse en un volumen monográfico. (A. J.)

Descartes

Y su sombra

DESCARTES. AN INTELLECTUAL BIOGRAPHY, por Stephen Gaukroger. Clarendon Press; Oxford, 1995.

DIVINE WILL AND THE MECHANICAL PHILOSOPHY. GASSENDI AND DESCARTES ON CONTINGENCY AND NECESSITY IN THE CREATED WORLD, por Margaret J. Osler: Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

PENETRALIA MOTUS. LA FONDAZIONE RELATIVISTICA DELLA MECCANICA IN CHRISTIAAN HUYGENS, CON LA EDIZIONE DEL CODEX HUGENIORUM 7A, por Gianfranco Mormino. La Nuova Italia Editrice; Florencia, 1993.

STENO ON MUSCLES, por Troels Kardel. The American Philosophical Society; Philadelphia, 1994.

NEWTON'S PRINCIPIA FOR THE COMMON READER, por S. Chandrasekhar. Clarendon Press; Oxford, 1995.

IL MONDO VISIBILE. GEORGE BERKELEY E LA "PERSPECTIVA", por Silvia Parigi, Leo S. Olschki editore; Florencia, 1995.

Se cumple este mes el cuarto centenario del nacimiento de René Descartes (1596-1650), iniciador de la filosofía moderna y uno de los pensadores más vigorosos de todos los tiempos. Inventor de la geometría analítica, dejó huella en física y en fisiología. Muchas de sus tesis se desvanecieron al poco —Newton fue su yunque—, pero perviven métodos y herramientas. De la sombra que proyectó a lo largo del siglo XVII y principios del siguiente en el ámbito de la ciencia son ejemplo los libros espigados aquí entre una copiosa siembra bibliográfica.

Stephen Gaukroger desnuda su vida en una monografía densa, *Descartes. An intellectual biography*. (Para la lectura directa de los escritos de Descartes se recomienda la edición de Adam y Tannery, aunque también resultan provechosas las traducciones al español de algunas obras.) Descartes alude en diversas ocasiones a sus años de formación en La Fleche, colegio regentado por los jesuitas y centro emblemático de la educación de la Contrarreforma, que sustituía el castigo corporal por premios y honores. El plan docente, o *Ratio studiorum* de la Compañía, incluía en la enseñanza normal debates académicos para que los alumnos fueran acostumbrándose al rigor de la dialéctica. Se promovía el aprendizaje del latín y griego, matemática y filosofía natural. Descartes salió de La Fleche familiarizado con Aristóteles y Platón, pasados por el tamiz de los comentaristas Fonseca, Toledo y los Conimbricenses.

Se gradúa luego en leyes por la Universidad de Poitiers, con la idea de entrar algún día en la administración del estado. Se enrola en el ejército del príncipe Mauricio de Nassau. Conoce a Isaac Beeckman, quien encarrila su precoz interés por la matemática y la física (caída libre de los cuerpos y paradojas de la hidrostática). Termina el *Compendium musicae*, un opúsculo escrito sobre la plantilla de las *Istituzioni harmoniche* de Guissefo Zarlino. Descartes parte de la existencia de dos propiedades principales del sonido (duración y tono) y sustituye los números de las proporciones de los intervalos por segmentos.

Se propone crear una base matemática general de todas las ciencias, al tiempo que va redactando reglas sobre el conocimiento y el método científico. Trabaja en una obra sobre poliedros (*De solidorum elementis*) y en óptica. En tales estudios anda ocupado cuando tiene el famoso sueño en el que abre el *Corpus Poetarum* por las palabras *Quod vitae sectabor iter*? (¿qué camino en la vida seguiré?). Viaja por Italia y se establece en 1625 en París, donde entra en el círculo intelectual que halla en Mersenne su catalizador; éste defendía la nueva física como la médula de la filosofía natural. Prosigue investigando en óptica geométrica y descubre quizás entonces la ley de la refracción, que aparecería en la *Dioptrique*.

En 1628 parte de nuevo a los Países Bajos, donde permanecerá casi hasta el final de su vida. Al principio, comparte la dedicación a las cuestiones metafísicas con la construcción de una máquina para pulir lentes hiperbólicas. Entre 1630 y 1633, termina los borradores de la *Dioptrique* y los *Météores*, cuyo prefacio se convertirá en el *Discours de la méthode*. Bucea en la anatomía con su *Traité de l'homme*, en el que defiende una idea mecanicista del cuerpo entendido como un autómata. Vuelve a la óptica, las leyes del movimiento y los principios generales de la cosmología. El borrador sin terminar del *Traité de la lumière* que nos ha llegado data probablemente de las postrimerías de 1632. Pocos años después aparecen la *Géométrie* y los tres *Essais*. Tras publicarse en 1641 las *Meditationes*, comienza a preparar un manual sistemático de su pensamiento filosófico, los *Principia*. Hacia 1646 tiene ya un primer esbozo de las *Passions de l'âme*, un tratado de ética. Condenado por teólogos protestantes, escapa a Francia en 1647, y entra en contacto con Hobbes, Gassendi y Pascal. A finales de febrero de 1649, recibe la invitación de la reina Cristina para trasladarse a Estocolmo. Un año más tarde moría allí de neumonía.

Aunque no halló la mathesis universal, vio en parte cumplido su ambicioso proyecto de abordar la tríada del saber de su tiempo: el mundo inerte, el mundo orgánico y el alma. Distinguió entre la mente, percibida como algo indudable, y el cuerpo, sujeto a los principios de la mecánica. Su teoría física, expuesta en *Le Monde*, se funda en la idea de que bastan la materia —divisible, no existe el vacío— y las leyes del movimiento para explicar el universo. La primera ley se refiere a la conservación del movimiento, la segunda a la conservación de la "fuerza del movimiento" y deja para la tercera ley la información sobre la dirección del movimiento: cualquiera que sea la trayectoria del cuerpo, su tendencia, o *acción*, es siempre rectilínea.

A partir de su concepto de materia y las leyes de la naturaleza, establece su cosmología, es decir, la formación del sol y las estrellas, los planetas y los cometas, la tierra y la luna, gravedad y mareas. La clave de esta cosmología reside en la explicación de los vórtices o torbellinos. Por ser un *plenum* el universo, se moverá una parte del mismo cuando todas las demás lo hagan. La forma elemental de movimiento es la circular, aunque no hay razón para pensar que el universo gira en torno a un solo centro. La materia que se mueva más cerca del centro será la más pequeña o menos agitada, y la más alejada del centro la más agitada. La razón de ello estriba en que esta última, la más fuerte, describirá el círculo mayor porque tendrá mayor capacidad para realizar su inclinación a continuar en movimiento rectilíneo. Así pues, el universo entero consta de un número indefinido de torbellinos contiguos, cada uno de los cuales tiene el sol o una estrella por centro, con las planetas girando a su alrededor.

Del concepto de materia defendido por Descartes discrepó desde muy pronto su compatriota Pierre Gassendi (1592-1655). Margaret J. Osler los

contrapone en *Divine will and the mechanical philosophy. Gassendi and Descartes on contingency and necessity in the created world*. Al considerar la materia componente último del mundo, los mecanicistas modificaron el campo semántico que hasta entonces cubría aquélla en la filosofía natural. Dejó de ser un término correlativo de la forma para aparecer con estatuto propio.

Para Gassendi el mundo natural constaba de átomos indivisibles y vacío que ocupaba los intersticios interatómicos. Vinculó el atomismo con la astronomía de Copérnico y la física de Galileo. Para explicar el vacío se apoya en argumentos avanzados ya por Epicuro, Lucrecio y Herón de Alejandría, así como en experimentos barométricos de sus contemporáneos Torricelli, Pascal y Auzout. De acuerdo con la explicación clásica distinguía tres categorías de vacío: el vacío extracósmico y separado; el vacío interparticulado, intersticial o diseminado; y el vacío mayor, o *coacervatum*, formado por un grupo de vacíos intersticiales y creado por una fuerza. A diferencia del vacío extramundano e intersticial, el *coacervatum* no es un producto de la naturaleza, sino que está producido por la acción de diversos instrumentos o máquinas. Unas veces se crea transitoriamente, como en los sifones, alambiques, fuelles o matraces. Otras veces se produce un vacío persistente, a saber, el espacio remanente por encima de la columna de mercurio en el barómetro. Las fuerzas responsables eran la presión y resistencia del aire.

La substancia corpórea está dotada de masa, puede tocarse y opone resistencia. Estas propiedades la convierten en tangible, su cualidad definidora, porque sólo se puede intervenir en la materia a través del contacto físico. Aunque advirtió que la materia se extendía en tres direcciones, distinguía entre sustancia corpórea y extensión matemática. A diferencia de las figuras geométricas, los cuerpos corpóreos no pueden tener longitud sin anchura y no pueden estar privados de masa y tamaño.

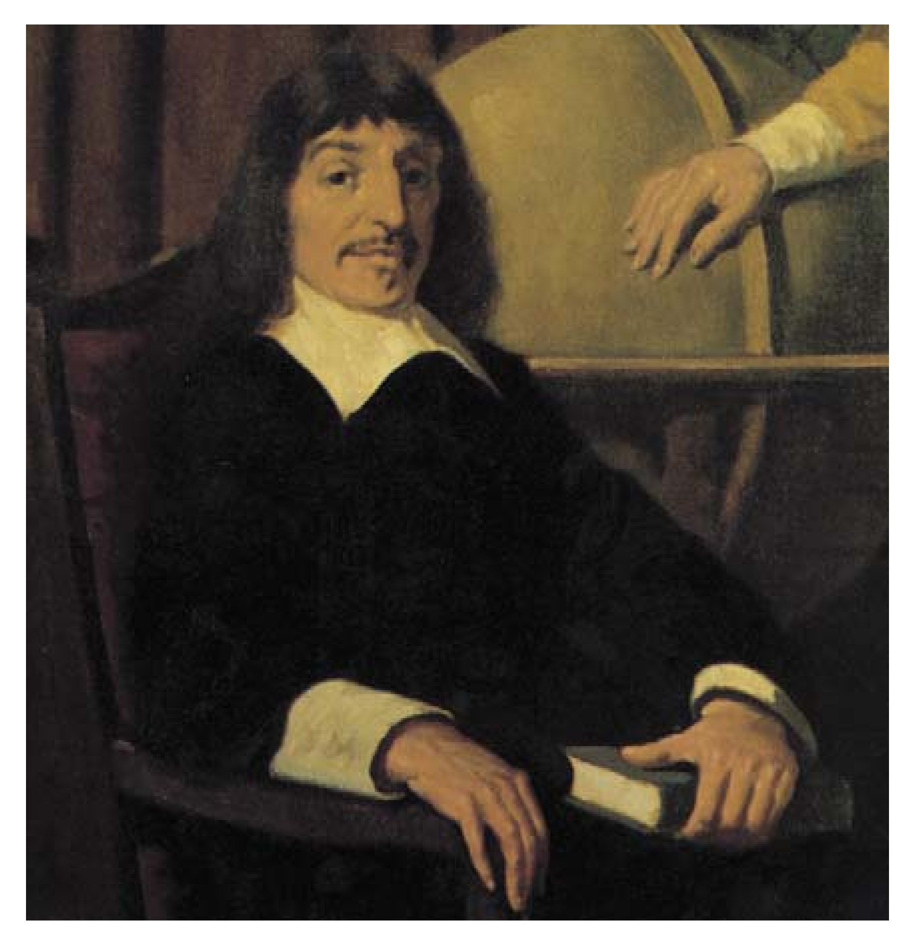
En parte lejos y en parte cerca de la fisiología de Descartes se sitúa Niels Stensen (1638-1686). No es cartesiano cuando expulsa de la miología a los espíritus animales. Lo es cuando propone una teoría mecánica sobre la locomoción animal. Podrá el lector comprobarlo en *Steno on muscles*, donde se recogen su *Nueva estructura de los músculos y el corazón* y su *Especimen de elementos de miología*. Les precede una introducción histórica de Troels Kardel, en la que aclara por qué esa teoría, formulada en 1667, cayó en un olvido de más de tres siglos, es decir, hasta 1990.

Stensen nació en Copenhague, en cuya universidad estudió medicina con Thomas Bartholin. Se trasladó luego a Amsterdam, donde en su primera disección descubrió el conducto excretor de la glándula parótida que lleva su nombre. En la Universidad de Leiden prosiguió sus trabajos endocrinos bajo la dirección de Frans del Boë y Jan van Horne. Distinguió entre glándulas linfáticas con vasos aferentes y eferentes y glándulas de secreción con vasos eferentes sólo. Tras identificar los conductos lagrimales, llegó a la conclusión de que las lágrimas las segregaban glándulas y no el cerebro.

Stensen describía la acción muscular como un proceso dinámico. Asoció la contracción a estructuras unipennadas que formaban un ángulo entre fibras y tendones. La contracción resultaba del encogimiento de fibras musculares de igual longitud entre tendones paralelos. La introducción de un modelo matemático le permitió inferir que la contracción isovolémica de las fibras de un músculo unipennado provocaba la hinchazón. Rechazaba, pues, que el abultamiento observado durante la contracción se debiera a la expansión del volumen.

La obra principal de Stensen sobre los músculos se publicó en Florencia en 1667. Se trataba de los *Elementorum myologiae specimen*. Según parece, la escribió a raíz de sus conversaciones con círculos ilustrados de París, Montpellier y Florencia, donde se había sometido a criba su anterior *De musculis et glandulis observationum specimen* (1664). En el prólogo proponía aplicar la matemática, que tan buenos resultados había cosechado en astronomía, óptica y geometría, al estudio de los organismos, en referencia clara a *Il Saggiatore* de Galileo.

El problema, que Stensen quería que resolvieran las matemáticas, aparecía en las dos páginas iniciales ilustrado por dos figuras. La primera mostraba la añeja estructura muscular: una suerte de huso, con fibras largas y curvadas en torno a un núcleo de fibras rectas y más cortas. Stensen quería sustituir esa estructura, completamente desconocida en la naturaleza, por una estructura prismática en paralelepípedo, con tendones constituidos en aristas en ambos extremos. Para él la fibra motora, con geometría



René Descartes. Cuadro de Norman Carter

de paralelepípedo, era el verdadero órgano del movimiento.

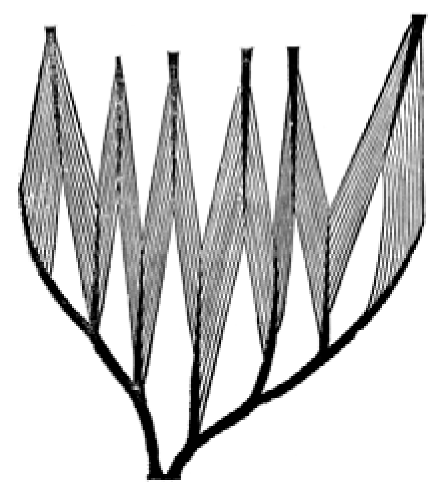
Si importante fue el influjo de Descartes en la explicación de la naturaleza de la materia, no fue menor en el tema central de la filosofía natural del XVII: el movimiento. Veámoslo en Christiaan Huygens (1629-1695), a través de *Penetralia motus. La fondazione relativistica della meccanica in Christiaan Huygens, con la edizione del Codex Hugeniorum* 7A, un trabajo escolar de Gianfranco Mormino en el que lo realmente destacable es el texto del holandés.

Sabido es que Huygens estableció la teoría ondulatoria de la luz y descubrió la forma de los anillos de Saturno, aprovechando la mejora introducida por él en las lentes de los telescopios. En la Universidad de Leiden estudió matemática y leyes. Conoció de niño a Descartes, y aunque se alejó bastante de sus tesis, rechazaba la identificación de cuerpo y extensión; sostuvo siempre con él que las explicaciones mecánicas eran las propias de la ciencia. Se dio a conocer entre los matemáticos con la publicación del *De circuli magnitudine inventa* (1654). Su interés por la medición cuidadosa del tiempo le llevó al descubrimiento del péndulo como regulador de los relojes.

En 1673 dio a la imprenta *Horologium oscillatorium*, donde aportaba soluciones de distintos problemas de dinámica: derivación de la fórmula para el tiempo de oscilación del péndulo simple, oscilación del cuerpo en torno a un eje estacionario y leyes de la fuerza centrífuga. La expresión "fuerza centrífuga", expresión acuñada por él, daba cuenta de la tendencia de los objetos en movimiento circular a salir despedidos fuera del centro del movimiento, como el caso de una piedra lanzada con una honda. Discrepante de la teoría newtoniana de la gravedad, él había esbozado la suya en 1669, aunque no la hizo pública hasta 1690 en su *Discours de la cause de la pesanteur*. La fundaba en los vórtices cartesianos.

El *Codex Hugeniorum* 7 A no es una compilación propia. Hay esbozos de un prólogo a un tratado sobre la colisión, otros para una proyectada edición conjunta de distintos trabajos sobre la colisión y la fuerza centrífuga, reflexiones sobre libros leídos y, sobre todo, reflexiones sobre la naturaleza del espacio y del movimiento; algunas hojas combinan el texto principal con extensas digresiones, a la manera de apuntes intercalados. Como el subtitulo señala, Huygens hace acopio allí de escritos, en gran parte inéditos, en torno a un principio general que explicara la naturaleza absoluta y relativa del movimiento y del reposo. Cuestión que brota con sus investigaciones sobre las colisiones y adquiere sentido pleno en sus trabajos sobre la fuerza centrífuga y la causa de la gravitación de los cuerpos.

La teoría cartesiana de los vórtices para explicar las órbitas planetarias fue destruida por Newton en el libro II de sus *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Sobre esta obra magna acaba de aparecer la que, a mi juicio, constituye la mejor glosa que se haya realizado hasta el presente: *Newton's Principia for the Common Reader*, de Subrahmanyian Chandrasekhar. Este profesor de astrofísica en la Universidad de Chicago desde 1937 hasta su muerte reciente recibió el Nobel por sus trabajos sobre la la evolución estelar. Eran proverbiales su profundidad y su claridad de exposición.



Músculo deltoides, según Niels Stensen

Chandrasekhar rompe con los moldes del historiador de la ciencia al uso. Deja de lado las fuentes secundarias; no se pierde en laberintos de erudición postiza. Se calza los borceguíes de Newton, penetra en su mente y va deshilvanando, proposición tras proposición hasta unas 150, la física matemática encerrada en los *Principia* que lleva a la ley universal de la gravedad. Diez años de trato continuo con la física del XVII para legarnos un impagable testamento. Hallará el lector los enunciados de las proposiciones, las pruebas que se construyen para su intelección actual y el cotejo subsiguiente de éstas con la argumentación newtoniana. No aborda enteros los *Principia*, sólo los libros primero y tercero. Le interesa, por encima de todo, presentar las proposiciones analíticas (es decir matemáticas) que constituyen la base, según las imaginó Newton, de su tesis principal que enuncia sin ambigüedad en la proposición VII del libro III: "Hay una fuerza de gravedad que pertenece a todos los cuerpos, proporcional a la distintas cantidades de materia que contienen."

En su búsqueda de los orígenes inmediatos de los *Principia*, compuestos entre otoño de 1684 y verano de 1686, distingue tres momentos cruciales. Cuando, mediados los sesenta, Newton había intentado ya dar con una prueba de la ley del inverso del cuadrado de la atracción gravitatoria. En 1679 volvió a retomar el asunto de la atracción y los movimientos planetarios, al considerar las leyes de las áreas de Kepler. Y, por fin, en 1684, cuando Halley visita a Newton para preguntarle qué figura describiría un cuerpo bajo una ley del inverso del cuadrado de atracción. Newton escribió en respuesta *De motu corporum in gyrum* (el movimiento de los cuerpos en rotación), tratado que consta de once proposiciones a las que antecede tres definiciones, cuatro hipótesis y dos lemas. Las proposiciones formarían luego parte de los *Principia*.

En las dos primeras lecciones, sobre definiciones y axiomas, que preceden a la apertura formal de los *Principia*, Newton formula y elabora los conceptos básicos y las leyes que apuntalan su filosofía natural. Debe procederse por pasos, y captar el método pedagógico del autor. Por ejemplo, cuando introduce con precisión la definición de masa, entendida como cantidad de materia, deja sin especificar la noción de *peso*, aunque manifiesta que la masa es proporcional al peso. La razón de ello estriba en que no puede hacerse una clara distinción entre masa y peso sin referirse a la segunda ley del movimiento (donde entran conceptos que no ha explicado todavía).

Chandrasekhar convierte en expresión vectorial la definición newtoniana de cantidad de movimiento. Será la tónica a lo largo del libro. A propósito del texto sobre la "vis insita", la inercia, el comentarista subraya como cualquier estudiante los fragmentos nucleares; para acabar glosando: "Sería muy difícil que pudiera añadirse una coma a la explicación precisa dada por Newton sobre el concepto de *inertia*. Pero

préstese atención a las expresiones subrayadas.” Saca a primer plano lo que está sobreentendido. Por ejemplo, en la formulación del valor inicial. En términos generales lo que esta condición impone es que, dado un estado inicial bien definido de un sistema físico, deberíamos poder predecir su desarrollo futuro. En el contexto newtoniano, por estado inicial de un cuerpo sometido a la acción de una fuerza centrípeta conocida no es más que su identificación con respecto al centro de fuerza y su velocidad en un instante dado de tiempo; a partir de ello, podemos conocer su desarrollo.

Newton, que basa su dinámica sobre las nociones de tiempo y espacio absolutos, establece para la misma tres leyes fundamentales del movimiento: la ley de inercia, la de la aceleración, y la de la acción y reacción. A ellas hay agregar cinco corolarios, que forman parte esencial de las leyes, como ya advirtiera el propio Maxwell. Hoy las conoce cualquier escolar. Así, de acuerdo con la primera ley del movimiento, la trayectoria rectilínea que un cuerpo seguirá en virtud de su inercia permanecerá inmutable mientras no encuentre impedimentos o fuerzas externas. Con las leyes físicas describe las nociones elementales del cálculo diferencial que constituyen la base de todo su relato.

La sombra de Descartes se alargó más allá del tiempo de Newton. Aun cuando éste se había convertido en norte seguro de la filosofía natural, la influencia del francés seguía sintiéndose. Sobre todo, en la relación entre teoría del conocimiento y aprehensión de los sentidos. Lo ha puesto de manifiesto en encuadre histórico Silvia Parigi en *Il mondo visibile. George Berkeley e la* “*Perspectiva*”. Del racionalismo de Descartes y del empirismo de Gassendi participa George Berkeley (1685-1753) en su esfuerzo por salvar el hiato entre mundo visible y mundo real. Competía trazar ese puente a la *perspectiva*, que designaba la óptica o teoría de la visión directa (distinta de la catóptrica y de la dióptrica, doctrinas que se ocupaban respectivamente de la visión refleja y refractada). Partes principales de la percepción visual eran las relacionadas con la distancia, magnitud y posición de los objetos en el espacio.

En el *Essay towards a new theory of vision* (1709), Berkeley niega la validez de la teoría de la visión geométrica, que hace uso de abstracciones matemáticas para fundar la realidad objetiva de las cualidades primarias de los cuerpos. Demuestra la imposibilidad de percibir con la vista la distancia (sinónimo de exterioridad y profundidad), el tamaño y la posición de los cuerpos. Prepara así el terreno para la metafísica del inmaterialismo, que expondrá el año siguiente en su *Treatise concerning the principles of human knowledge*, desembarazándose de entrada de una grave dificultad de su sistema: la visibilidad de las cosas a distancia. Las líneas y los ángulos, que “encajonan” los objetos visibles y llevan las formas al ojo, no son por sí mismos visibles. Para él, lo exterior es puro fenómeno. Ni la vista, ni el tacto pueden ponerse en contacto con los cuerpos exteriores; no sólo las cualidades visibles, sino también las propiedades tangibles de las cosas son ideas; los propios cuerpos son ideas.

En efecto, el ojo del cuerpo no extiende su poder más allá de los fenómenos. Lo que suceda allende el acto de la visión, haciendo posible la percepción, es asunto de la fisiología y la metafísica. Sería un error vulgar, observa Berkeley, identificar los objetos propios e inmediatos de la vista con las imágenes retinianas. Delimita los campos. “Explicar de qué modo la mente o el alma ve es una cosa, y concierne a la filosofía. Considerar partículas que se mueven a lo largo de determinadas líneas, rayos de luz refractados o reflejados, que se entrecruzan y forman ángulos, es una cosa enteramente distinta, y concierne a la geometría. Dar cuenta del sentido de la vista a través del mecanismo del ojo es una tercera cosa, y concierne a la anatomía y a los experimentos. Estas dos últimas investigaciones tienen una utilidad práctica... La primera consiste en que nos permite comprender la verdadera naturaleza de la visión, entendida como facultad del alma.”

En su teoría de la percepción convergen, pues, la filosofía natural y la gnoseología, en la que desempeña un papel destacado el sentido común, auténtico freno que le impide negar la existencia de la realidad externa. No la niega, pero le quita virtualidad sustantiva. La supuesta visibilidad del tamaño es una ilusión, la conclusión de un juicio repentino fundado en el uso del lenguaje y en la falta de reflexión. Es un prejuicio reforzado por el tiempo. En realidad vemos la distancia y la magnitud de los objetos del mismo modo que vemos la vergüenza y la cólera en el rostro del hombre. (L. A.)

Teoría cuántica

De Broglie-Bohm

THE QUANTUM THEORY OF MOTION. AN ACCOUNT OF THE DE BROGLIE-BOHM CAUSAL INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS, por Peter R. Holland. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

Una de las grandes revoluciones en la física de primeros de este siglo se plasmó en la mecánica cuántica. Con un formalismo matemático preciso y con un éxito pragmático total, la mecánica cuántica ha mostrado una sorprendente fragilidad conceptual y una radical ausencia de imaginación pictórica. En la mecánica clásica, los conceptos parecen tener un correlato claro y preciso y su lenguaje, en paralelo al formalismo matemático subyacente, posibilita considerar que los cuerpos físicos se encuentran en el espacio-tiempo y, en él, pueden tanto describirse como explicarse los fenómenos al igual que predecir su comportamiento.

La mecánica cuántica, en su concepción ortodoxa o de Copenhague, supone un radical cambio en lo que cabía considerar concepción “natural”, intuitiva del mundo. Así, los objetos materiales, si bien ocupan un lugar en el espacio, resulta que en determinadas circunstancias ese lugar no es región alguna concreta. Las leyes por las que se gobiernan los objetos físicos ordinarios dejan de ser válidas cuando esos objetos se utilizan como instrumentos de observación o medida; en otras palabras, el observador interviene de modo decisivo en aquello que observa. El azar no es algo ligado al conocimiento o limitación epistémica humana, sino que es un elemento intrínseco a la naturaleza, por lo cual el conocimiento de ésta ha de ser básicamente probabilístico. Tres notas que impiden la elaboración de modelos simples, y visualizables, de la mecánica cuántica, donde la dicotomía onda-partícula se hace algo más profundo y frontera para esa elaboración.

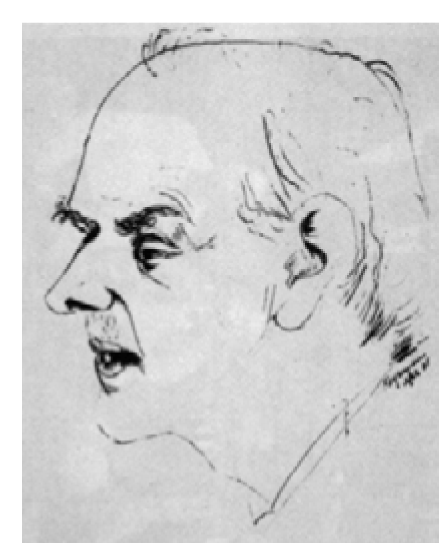
Frente a la concepción ortodoxa se han ido alzando líneas heterodoxas que pretenden la formulación de una mecánica cuántica que dé cuenta de tales éxitos, de todos los fenómenos subatómicos conocidos, y posibilite un cuadro en el cual no se tengan consecuencias como las antes señaladas. Es decir, que se tenga un cuadro en el cual se sustituya la concepción probabilís-

tica y subjetiva por una concepción causal y determinista. En línea con Schrödinger, fue Bohm uno de los pioneros en intentar la elaboración de un cuadro formal más acorde con el clásico desde 1952. Y es en esta línea heterodoxa en la cual se inserta la obra de Holland.

De modo radical, el enfoque que Holland adopta supone una inversión conceptual. Por lo pronto, se pretende que la mecánica clásica y la cuántica tienen la misma estructura teórica, lo cual no significa que una se reduzca a la otra. Pero este objetivo supone poder dar cuenta de una noción clave en la mecánica clásica —la trayectoria bien definida de partícula— noción que realmente ha desaparecido en la cuántica. Desde la posición adoptada por Holland esa trayectoria no aparece como caso límite, sino consecuencia de los tipos de movimiento que las partículas pueden realizar. Y ello porque se invierte el proceso usual por el que la dinámica de partículas se define: en lugar de introducir las trayectorias a través del lagrangiano o el hamiltoniano con demostración posterior de que la ecuación correspondiente es consistente, ahora se definen las trayectorias, directamente, como soluciones de la ecuación Hamilton-Jacobi. Si en la concepción ortodoxa la dinámica de partículas es la que implica la evolución del campo en un espacio de configuración, desde la inversión actual es la dinámica del campo en un espacio de configuración la que implica la dinámica de partículas.

Esta inversión supone una nueva teoría del movimiento —y, de ahí, el título de la obra— pero también, consecuente, una nueva concepción de la materia. Materia que pasa a tener un aspecto intrínseco por el cual las masas puntuales se mueven e interactúan no ya por potenciales preasignados de naturaleza independiente y externos a los puntos sobre los que actúan, sino que se mueven e interactúan también por una energía interna. Y ello conlleva la afirmación de que esta inversión produce una síntesis de las características corpuscular y ondulatoria de la materia que ahora ya no son mutuamente excluyentes sino que existen simultáneamente. No onda *versus* partícula, sino onda *y* partícula. Y esa existencia simultánea posibilita afirmar que se tiene una teoría causal determinista frente a la visión ortodoxa.

Así, un sistema material, como el electrón, aparece como una partícula guiada por una onda cuántica que actúa como un campo, y bien entendido que la función de onda no se toma, ya, como mero constructo matemático sino como un ente físico. Desde este enfoque se realiza un estudio de los fenómenos clásicos para mostrar que las órbitas espaciotemporales de un conjunto de partículas reproducen las predicciones de la mecánica estadística cuántica clásica. En el libro de Holland, se van desarrollando alguno de los principales fenómenos ligados a la mecánica cuántica: interferencia, efecto túnel, estabilidad de materia, espín 1/2, correlaciones no-locales. En este enfoque, la observación, o la medición, no hace que la función de onda colapse. (J. L.)



Dibujo de Dirac por Feynman

Entomología

Selección

EL MUNDO DE LOS INSECTOS, por VV.AA. Temas 2. Investigación y Ciencia. Prensa Científica, S. A. 1995.

Este libro aparece con el mismo formato y con igual calidad y largueza de ilustración que *Investigación y Ciencia* y comprende artículos que aparecieron ya o pudieran muy dignamente aparecer en *Investigación y Ciencia*. Representan un material de gran calidad, que de no ser por este último recurso compilador, escaparía a los lectores habituales de la mencionada revista. Este volumen incluye 15 artículos principales más 7 notas, muy interesantes y repartidas a manera de complementar tipográficamente la obra. Se leen con gusto las que se refieren a episodios de la historia de las ciencias naturales en España y una entrevista con Edward O. Wilson.



Paraphaenops breuilianus

Wilson, junto con su colaborador Hölldobler son autores de un artículo sobre hormigas tejedoras. Las hormigas, como es natural, despiertan interés y a ellas se refieren otros dos artículos, que examinan la noción de inteligencia colectiva (Théraulaz y colaboradores) y algunos aspectos de sus relaciones simbióticas con otros insectos (DeVries). Sin embargo, relativamente más favorecidos salen los insectos que viven en la superficie del agua, estudiados por sendos artículos complementarios debidos a L. Milne y M. Milne, y a J. Walker; éste último ofrece las pistas necesarias para penetrar con bastante profundidad en la vida y milagros de los zapateros.

El volumen empieza con un texto introductorio de X. Bellés. Otras contribuciones tratan de insectos que filtran dentro del agua. Sobre la forma como se alimenta el mosquito *Aedes* en estado adulto (J. C. Jones) y otros aspectos de la vida de estos insectos. Dos artículos se refieren a coleópteros, uno sobre estercoleros africanos (Heinrich y Bartholomew) y otros sobre el significado de las prolongaciones corniformes de algunos coleópteros y sobre la forma como los utilizan (Eberhard). Otros artículos tratan de la percepción de la luz polarizada y orientación con respecto a ella (Wehner), defensas químicas de los termes (Prestwich), el mecanismo de escape de la cucaracha (Camhi). J. M. Valderas ha preparado una miscelánea y se agradecen sus notas sobre la historia de la entomología y en especial de la española. (R. M.)

Apuntes

Medicinas por presentes

La mirra fue uno de los tres regalos ofrecidos por los Reyes Magos. Desde mucho antes del inicio de nuestra era se conocían ya las propiedades farmacéuticas que encierra ese exudado de los arbustos del género *Commiphora*. La mirra concentra aceites esenciales, gomas hidrosolubles y resinas solubles en alcohol. Los egipcios la usaban para embalsamar y los judíos como óleo de ungir. Ahora, un grupo de investigadores de la Universidad de Florencia han desentrañado dos componentes de la mirra con actividad analgésica (dos sesquiterpenos), que operan a través de los receptores cerebrales de opioides.

Creced y multiplicaos

"En 1945", cuenta Arthur Kornberg, discípulo de Ochoa, y con él ganador del Nobel, "parecía ya evidente que los cazadores de vitaminas habían rematado todas las presas. Había llegado el turno de los enzimólogos." Desde entonces el arte venatoria no ha parado de cobrarse nuevas piezas. Por ceñirnos a las kinasas: a mediados de los cincuenta Edwin Krebs y Edmond Fischer descubrieron el carácter regulador de la fosforilación reversible de las proteínas, lo que llevó a la caracterización de la primera kinasa, la fosforilasa. Durante años, los bioquímicos llevaban en la cartera el manojo de kinasas que con dificultad iban hallándose. Con el advenimiento de nuevas técnicas moleculares, muchísimo más refinadas, aquellas breves cuartillas se han convertido en un mazo imponente de más de 1002 fosfatasas involucradas en la reversibilidad de los mecanismos reguladores.

De lo (pre)dicho al hecho

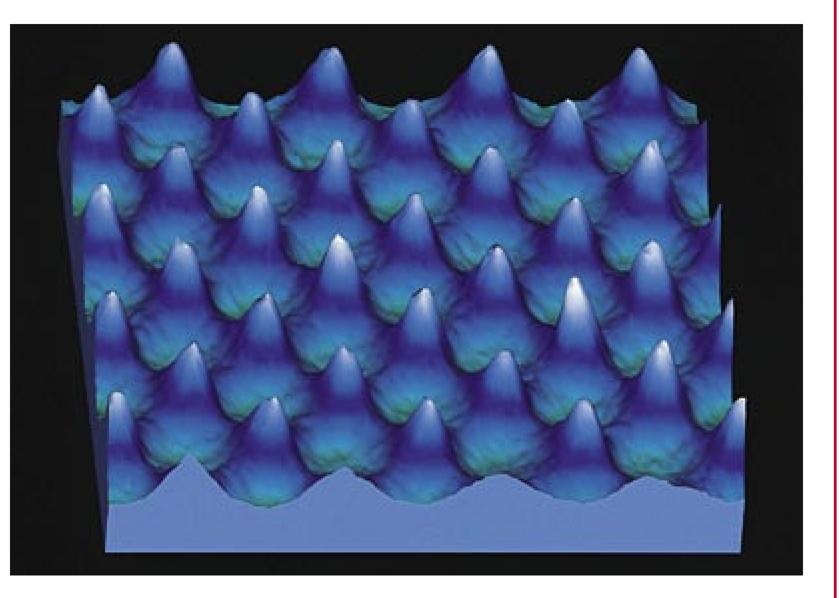
En su esfuerzo por alcanzar siquiera sean las migajas del presupuesto destinado a la investigación, el informe de los solicitantes suele terminar ponderando el interés de su trabajo en la obtención de nuevos fármacos más eficaces o de extraordinarios beneficios para la industria. Se trata de un optimismo legítimo. La experiencia, sin embargo, es más roma. Veinte años atrás, el descubrimiento de los péptidos cerebrales prometía obtener opiáceos que liberarían de la tiranía de la adicción; hace diez, sosteníase que los anticuerpos monoclonales serían la panacea que curaría el choque séptico, tumores y enfermedades de rechazo. Desgraciadamente, estamos casi como estábamos. En su descargo, sin embargo, ha de reconocerse, y ese es un valor nada despreciable, que cuando un compuesto nuevo se convierte en medicina útil ello se debe a que se le ha encontrado aplicación en campos distintos de los pensados en su origen. Tal ha ocurrido con el interferón y las interleucinas

Cuando no salen las cuentas

La diferencia entre el flujo mensurado de neutrinos solares y el que se infiere de los modelos constituye el *problema de los neutrinos*. Es mucho menor el flujo observado. La culpa de la discrepancia podría estar en las hipótesis establecidas, según revela un estudio reciente de la correlación entre las variaciones del flujo de neutrinos y los cambios operados en el viento solar. Una correlación que se muestra coherente con la conversión resonante de neutrinos electrónicos en un tipo neutrínico que escapa a la detección por las interacciones con el campo magnético del sol en la corona del astro.

Luz sobre materia

Los microcircuitos se fabrican con discos de silicio grabados por medio de pulsos de luz proyectados a través de plantillas. Puesto que ese método parece haber dado ya de sí cuanto podía ofrecer, se especula ahora con proyectar materia a través de plantillas de luz. El equipo de Jabez J. McClelland, del norteamericano Instituto Nacional de Pesos y Medidas, ha optado por esa nueva vía y ha creado una parrilla de puntos de cromo sobre una lámina delgada de silicio. Los puntos miden 80 nanómetros de diámetro, muy por debajo de lo que puede dibujarse con luz ultravioleta. Se han servido de una técnica de deposición atómica focalizada por láser. Confían en obtener dos mil millones de plantillas de circuitos en una pastilla de un centímetro cuadrado.



Seguiremos explorando los campos del conocimiento



DESNUTRICION, POBREZA Y DESARROLLO INTELECTUAL, por J. Larry Brown y Ernesto Pollitt

La investigación sobre nutrición infantil pone de manifiesto formas desconocidas en que la dieta insuficiente condiciona el desarrollo mental. Por si fuera poco, otros aspectos de la pobreza agravan los efectos negativos.

SISTEMA GLOBAL DE DETERMINACION DEL LUGAR, por Thomas A. Herring

Dos docenas de satélites a miles de kilómetros de altura permiten localizar personas en la superficie terrestre con extraordinaria precisión.

VISION SUBMARINA A TRAVES DEL RUIDO DE FONDO, por Michael J. Buckingham, John R. Potter y Chad L. Epifanio

Mediante una técnica llamada creación de imágenes por iluminación acústica, los sonidos del mar pueden "iluminar" objetos sumergidos, creando así películas en color sin necesidad del sonar.

TELOMEROS, TELOMERASA Y CANCER, por Carol W. Greider y Elizabeth H. Blackburn

Cierta enzima poco familiar, la telomerasa, actúa obviamente sobre los telómeros, que son las puntas de los cromosomas. Recientemente se ha detectado su presencia en muchos tumores humanos, razón por la que está en el punto de mira de las terapias contra el cáncer.

CATACLISMOS GALACTICOS, por Sylvain Veilleux, Gerald Cecil y Jonathan Bland-Hawthorn

Las enormes efusiones de gas que se producen en los núcleos de las galaxias cercanas podrían ayudarnos a comprender el proceso de la formación estelar y la naturaleza del medio intergaláctico.

BACTERIAS TRAS LAS ULCERAS, por Martin J. Blaser

Un tercio, si no la mitad de la población mundial porta Helicobacter pylori, *una bacteria "lenta" que infecta el estómago causando úlceras y cáncer.*

EL PRIMER ORNITORRINCO AMERICANO, por Rosendo Pascual

¿Viven todavía mamíferos que posean rasgos mucho más primitivos que los fósiles más antiguos de su misma clase conocidos? Viven. Son los monotremas, que agrupan a ornitorrincos y equidnas.

QUARKS POR ORDENADOR, por Donald H. Weingarten

Cómputos de años de duración han contribuido a confirmar la teoría fundamental subyacente a los quarks, e incluso, aplicando sus principios, permitido la identificación de una nueva partícula.

